

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-174653

(P2004-174653A)

(43) 公開日 平成16年6月24日(2004.6.24)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

B25J 5/00

B25J 13/00

F1

B25J 5/00

B25J 13/00

F

Z

テーマコード(参考)

3C007

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2002-343096 (P2002-343096)  
(22) 出願日 平成14年11月26日(2002.11.26)(71) 出願人 000003207  
トヨタ自動車株式会社  
愛知県豊田市トヨタ町1番地  
(74) 代理人 110000110  
特許業務法人快友国際特許事務所  
(72) 発明者 山本 貴史  
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内  
Fターム(参考) 3C007 BS27 CS08 HS27 HT04 HT19  
LV24 MT05 WA03 WA13 WB07

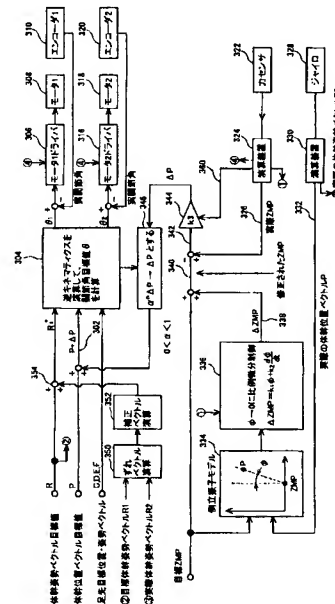
(54) 【発明の名称】 倒立振り制御のゲインを静止時に下げる歩行ロボット

(57) 【要約】

【課題】歩行中は「倒立振り制御」が適度に効いて転倒しないで歩行することができ、静止中に「自励振動」を起こさないロボットを実現する。

【解決手段】ロボットの実際の体幹位置と目標ZMPを結ぶ線と目標ZMPを通る垂線がなす角度 $\phi$ に基づいて目標ZMPを補正する制御、すなわち、「倒立振り制御」を実行にあたって、歩行動作中は角度 $\phi$ に対して大きな目標ZMPの補正量 $\Delta ZMP$ を算出し、静止中は角度 $\phi$ に対して小さな目標ZMPの補正量 $\Delta ZMP$ を算出する。すなわち、角度 $\phi$ に乗じる第1ゲインと、角度 $\phi$ の変化速度に乗じる第2ゲインを、静止中は小さくする。歩行中は「倒立振り制御」が適度に効くために転倒しないで歩行することができ、静止中は「倒立振り制御」の効きが抑制されるために「自励振動」を起こさない

【選択図】 図19



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

ロボットの実際の体幹位置と目標 Z M P を結ぶ線と目標 Z M P を通る垂線とがなす角度に基づいて目標 Z M P を補正する制御系を持つ歩行ロボットであり、歩行動作中は前記角度に対して大きな目標 Z M P の補正量を算出し、静止中は前記角度に対して小さな目標 Z M P の補正量を算出する歩行ロボット。

## 【請求項 2】

前記角度に第 1 ゲインを乗じた値と前記角度の変化速度に第 2 ゲインを乗じた値とを合計して目標 Z M P の補正量を算出する手段と、歩行動作中は大きな第 1 ゲインと第 2 ゲインを採用し、静止中は小さな第 1 ゲインと第 2 ゲインを採用するゲイン変化手段とを有する請求項 1 の歩行ロボット。

10

## 【請求項 3】

ロボットの実際の体幹位置と目標 Z M P の水平方向の偏差に基づいて目標 Z M P を補正する制御系を持つ歩行ロボットであり、歩行動作中は前記偏差に対して大きな目標 Z M P の補正量を算出し、静止中は前記偏差に対して小さな目標 Z M P の補正量を算出する歩行ロボット。

## 【請求項 4】

前記偏差に第 1 ゲインを乗じた値と前記偏差の変化速度に第 2 ゲインを乗じた値とを合計して目標 Z M P の補正量を算出する手段と、歩行動作中は大きな第 1 ゲインと第 2 ゲインを採用し、静止中は小さな第 1 ゲインと第 2 ゲインを採用するゲイン変化手段とを有する請求項 3 の歩行ロボット。

20

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、歩行するロボットが転倒しないように制御する技術、すなわち、倒立振子制御と通称される制御技術に関する。

## 【0002】

【従来の技術】歩行ロボットの場合、Z M P（ゼロモーメントポイント：動的平衡点ともいう：ロボットが歩行するとロボットから路面に重力と歩行運動に伴って生じる慣性力が作用し、ロボットには路面からその反力が作用する。路面からロボットに作用する反力によるモーメントがゼロになる点を Z M P という）を参照してロボットを制御することによってロボットが転倒しないようにする制御技術が採用される。

30

具体的は、ロボットの実際の体幹位置と目標 Z M P を結ぶ線と目標 Z M P を通る垂線とがなす角度を算出し、算出された角度に基づいて目標 Z M P を補正する制御系を用意する。この制御系が用意されていると、ロボットの転倒方向に目標 Z M P を送り出す制御が実施され、ロボットが転倒することが防止される。

## 【0003】

通常は下記の処理手順を実行する。

(1) ロボットの実際の体幹位置を示す体幹位置ベクトルを求める。

(2) 体幹位置ベクトルが指すポイントと目標 Z M P を結ぶ線と目標 Z M P を通る垂線とがなす角度  $\phi$  を算出する。

40

(3) 算出された角度  $\phi$  にゲインを乗じることによって、目標 Z M P の補正量を求める。

(4) 補正前の目標 Z M P に、目標 Z M P の補正量を加えて、補正後の目標 Z M P を算出する。

(5) 補正された目標 Z M P と、ロボットの位置や姿勢を指定するベクトルに基づいて、ロボットの各関節の関節角を計算する。

(6) 各関節の実際回転角を、計算された関節回転角に一致させる。

上記した制御は「倒立振子制御」と通称され、ロボットの転倒方向に目標 Z M P を送り出すことによってロボットが転倒することを防止できる。

上記において、算出された角度  $\phi$  にゲインを乗じることによって目標 Z M P の補正量を求める比例制御に代えて、角度  $\phi$  に第 1 ゲインを乗じた値と角度  $\phi$  の変化速度に第 2 ゲイン

50

を乗じた値とを合計して目標ZMPの補正量を算出してもよい。比例微分制御を導入することによって応答速度を改善することができる。

ロボットの実際の体幹位置の高さが変わらなければ、ロボットの実際の体幹位置と目標ZMPの水平方向の偏差が前記の角度 $\phi$ に相当するために、角度 $\phi$ に代えて水平方向の偏差を用いることもできる。

従来の技術の一例が特許文献1に記載されている。

【特許文献1】

特開平5-305579号公報

【0004】

【発明が解決しようとする課題】「倒立振子制御」をロボットに実装することによって、  
ロボットは転倒方向に支持点を移動することによって転倒を免れる。

ロボットが歩行するには、「倒立振子制御」が適度に効くことが必要であり、角度 $\phi$ に乘じる第1ゲインの値や、角度 $\phi$ の変化速度に乘じる第2ゲインの値等を適値に調整しておかなければならない。

しかしながら、ロボットが歩行するのに適当なゲインの値に調整しておく、ロボットの静止（歩行しないで立っていることをいう）時に、ロボットが体幹を前方に傾けてからそれを修正する動作を繰り返す現象が生じる。ここではそれを自励振動という。自励振動が生じると、ロボットの動力が無駄に消費されて不都合である。

本発明では、歩行中に「倒立振子制御」が適度に効いて転倒しないで歩行することができ、しかも静止中に「自励振動」を起こさないロボットを実現することを課題とする。

【0005】

【課題を解決するための手段と作用】本発明のロボットは、ロボットの実際の体幹位置と目標ZMPを結ぶ線と目標ZMPを通る垂線がなす角度 $\phi$ に基づいて目標ZMPを補正する制御、すなわち、「倒立振子制御」を実行するロボットに関する。

本発明の歩行ロボットは、歩行動作中は前記角度 $\phi$ に対して大きな目標ZMPの補正量 $\Delta ZMP$ を算出し、静止中は前記角度 $\phi$ に対して小さな目標ZMPの補正量 $\Delta ZMP$ を算出する。

このロボットの場合、歩行中は「倒立振子制御」が適度に効くために転倒しないで歩行することができ、静止中は「倒立振子制御」の効きが抑制されるために「自励振動」を起こさない。

前記角度 $\phi$ に第1ゲインを乗じた値と角度 $\phi$ の変化速度に第2ゲインを乗じた値とを合計して目標ZMPの補正量 $\Delta ZMP$ を算出する場合、すなわち、比例微分制御方式を採用する場合、歩行動作中は大きな第1ゲインと第2ゲインを採用し、静止中は小さな第1ゲインと第2ゲインを採用するゲイン変化手段を備えることが好ましい。

ロボットの実際の体幹位置の高さが実質上変わらなければ、ロボットの実際の体幹位置と目標ZMPの水平方向の偏差が前記の角度 $\phi$ にほぼ比例するとできるので、前記した水平方向の偏差に基づいて目標ZMPを補正することができる。この場合、歩行動作中は前記偏差に対して大きな目標ZMPの補正量を算出し、静止中は前記偏差に対して小さな目標ZMPの補正量を算出する。

偏差に基づいて比例微分制御を採用することもでき、この場合には、偏差に第1ゲインを乗じた値と偏差の変化速度に第2ゲインを乗じた値とを合計して目標ZMPの補正量を算出する。歩行動作中は大きな第1ゲインと第2ゲインを採用し、静止中は小さな第1ゲインと第2ゲインを採用する。

【0006】

【発明の実施の形態】下記に説明する実施例の主要な特徴を列記する。

（形態1） 補正された目標ZMPは実際のZMPと比較され、偏差によって目標体幹位置ベクトルを補正するために利用する。

（形態2） 静止中は、補正された目標ZMPと実際のZMPの偏差を目標体幹位置ベクトルの補正量に変換するゲイン $k_3$ も下げる。

（形態3） 歩行中と静止中とで、前記ゲイン $k_3$ の値を変えない。

## 【0007】

【実施例】図5は、2足で歩行するロボットにティーチングする歩行指令データを作成する装置1を示している。この歩行指令データ作成装置1は、2足歩行ロボットを実際に動作させるのに先立って用いられ、2足歩行ロボットを実際に動作させるために必要な歩行指令データを作成するために利用される。この装置1で作成された歩行指令データは、2足歩行ロボットにティーチングされる。2足歩行ロボットはティーチングされた歩行指令データに従って歩行する。

## 【0008】

歩行指令データ作成装置1には、オペレータが、2足歩行ロボットを歩行させたいコース等のデータを入力する。具体的には、図5の左下の(A)に示される6個のベクトルを入力する。ベクトルPは体幹位置ベクトルであり、座標原点から見たロボットの体幹位置を示す。ベクトルRは体幹姿勢ベクトルであり、ロボットの体幹の向きを示す。人間の背骨に相当する部材が伸びる方向を示す。ベクトルCは左足先位置ベクトルであり、座標原点から見たロボットの左足先位置を示す。体幹位置ベクトルPからのベクトルで指定することもできる。ベクトルDは左足先姿勢ベクトルであり、左足先の向きを示す。ベクトルEは右足先位置ベクトルであり、座標原点から見たロボットの右足先位置を示す。体幹位置ベクトルPからのベクトルで指定することもできる。ベクトルFは右足先姿勢ベクトルであり、右足先の向きを示す。オペレータは、これらの6種のベクトルを時系列に従って次々に入力する。なお、このためのデータ入力支援ソフトが開発されており、主要タイミングでのデータを指定することで、時系列での中間データが補完計算されるようになっている。また、一步分の歩行指令データを繰り返して利用するように指示することで、入力量を低減することができる

## 【0009】

オペレータは、さらに、目標ZMP位置を時系列に従って入力する。この場合ベクトルC～Fによって、左足接地状態・両足接地状態・右足接地状態の別がわかっていることから、左足接地状態では左足接地面内の位置を指定し、右足接地状態では右足接地面内の位置を指定する。図5の右下に示される(B)は、Y方向の目標ZMPの時系列変化の一例を示し、両足接地期間内の目標ZMPは入力の必要がない。歩行方向(X方向)の目標ZMPも同様であり、左足接地状態では左足接地面内の位置を入力し、右足接地状態では右足接地面内の位置を入力する。両足接地期間内のX方向の目標ZMPは入力する必要がない。

## 【0010】

図1は、目標ZMPの設定方法を示している。この場合、ロボットはX方向に歩行する。歩行方向に直交する方向をY方向とする。ロボットは、両足接地期間と片足接地期間を交互に繰り返して歩行する。片足接地期間内の目標ZMPは、接地足の接地面内になければならない。さもなければ、実際ZMPを目標ZMPに一致させてもロボットは転倒してしまう。両足接地期間内の目標ZMPは、2つの接地面を結ぶ領域にあればよい。Y方向の現象を考察すると明らかに、両足が接地している期間内に、目標ZMPは左足接地面内から右足接地面内に移動しなければならない(傾斜線C2参照)。あるいは、右足接地面内から左足接地面内に移動しなければならない(傾斜線C4参照)。水平線C1は、左足のみが接地している場合の目標ZMPを示し、目標ZMPは左足接地面内に維持されている。水平線C3は、右足のみが接地している場合の目標ZMPを示し、目標ZMPは右足接地面内に維持されている。

## 【0011】

X方向の目標ZMPもほぼ同様の条件を満たす必要がある。水平線C6は、左足のみが接地している場合のX方向の目標ZMPを示し、X方向の目標ZMPは左足接地面内に維持されている。水平線C8は、右足のみが接地している場合のX方向の目標ZMPを示し、X方向の目標ZMPは右足接地面内に維持されている。両足が接地している期間内に、X方向の目標ZMPは左足接地面内から右足接地面内に移動し(傾斜線C7参照)、あるいは、右足接地面内から左足接地面内に移動しなければならない(傾斜線C9参照)。水平

線 C 1 0 は、再び左足のみが接地している場合の X 方向の目標 Z M P を示し、X 方向の目標 Z M P は左足接地面内に維持されている。この場合、ロボットが歩行して X 方向に移動するために、水平線 C 6 の X 座標と水平線 C 1 0 の X 座標は、歩幅分変化している。

#### 【 0 0 1 2 】

図 1 に示した目標 Z M P を設定しておき、歩行時に観測される実際 Z M P が目標 Z M P に一致するように制御することによって、ロボットは転倒しないで歩行することが可能となる。

しかしながら、図 1 に示す目標 Z M P は、時間に対して、静止・等速変化・静止・等速変化・・・を繰り返す。静止から等速変化に切り替わるタイミングや、等速変化から静止に切り替わるタイミングでは、無限大の加速度または減速度が必要とされ、ロボットには大きな負荷が作用する。またロボットの動作はぎこちないものとなる。これらの要素が、ロボットの最大歩行速度を低く抑えている。

10

#### 【 0 0 1 3 】

無限大の加速度または減速度が必要とされる目標 Z M P の変化パターンを修正する試みがいくつかなされている。図 2 ( B ) は、図 2 ( A ) のパターンを遅延処理することによって平滑化したものであり、平滑化することによって、必要な加速度や減速度の最大値を小さく抑えることができる。

遅延処理して平滑化した目標 Z M P は、歩行パターンに比して遅れるために、ロボットの歩行姿勢が安定しないという問題が生じる。図 2 ( B ) の P 1 2 は、両足接地状態から右足接地状態に移行するタイミングに相当する。このときには目標 Z M P が右足接地面内になければならない。しかしながら、図 2 ( B ) に示すように、遅延処理して平滑化した目標 Z M P の変化パターンは遅すぎ、例えば右足接地面内になければならないときにまだ右足接地面内にないことがあり、その遅れがロボットの歩行姿勢を不安定なものとし、ひどい場合には転倒してしまうことになる。

20

なお本明細書では「右足接地状態」という場合は、右足のみが接地している状態を意味する。両足接地状態でも右足は接地しているが、その場合には両足接地状態といい、右足接地状態とはいわない。左足接地状態も同様である。

#### 【 0 0 1 4 】

図 2 ( C ) は、目標 Z M P のシャープな変化点をスムージング処理した目標 Z M P を示している。スムージング処理することによって、必要な加速度や減速度の最大値を小さく抑えることができる。

30

スムージング処理した目標 Z M P は、歩行パターンに比して、早すぎたり遅すぎたりするためにロボットの歩行姿勢が安定しないという問題が生じる。図 2 ( C ) の P 1 3 は、両足接地状態に移行する直前であって左足接地状態にまだあるタイミングに相当する。それにも係わらず、目標 Z M P は左足接地面内から外れ始めている。これでは早すぎる。図 2 ( C ) の P 1 4 は、両足接地状態から右足接地状態に移行するタイミングに相当する。このときには、目標 Z M P が右足接地面内になければならない。それにも係わらず、目標 Z M P はまだ右足接地面内にない。これでは遅すぎる。スムージング処理した目標 Z M P は、歩行パターンに比して早すぎたり遅すぎたりし、そのずれがロボットの歩行姿勢を不安定なものとし、ひどい場合には転倒してしまうことになる。

40

#### 【 0 0 1 5 】

現在の技術では、図 2 ( A ) に示した目標 Z M P 軌道が持つ問題点を、新たな問題が起こらないようにして解決することができず、ロボットの高速歩行を妨げる一つの要因となっている。この問題に対して、本実施例では、下記のように対応する。

#### 【 0 0 1 6 】

図 5 ( B ) に例示されるように、入力された目標 Z M P は時間軸に沿ってみると不連続である。歩行指令データ作成装置 1 には、時間に対して不連続な目標 Z M P を接続する軌道を計算する処理部 6 が用意されている。処理部 6 では、図 5 ( B ) に例示された時間的に不連続な期間（両足接地期間に相当する）を、図 5 ( C ) に例示するように、当加速度軌道 A と等速度軌道 B と等減速度軌道 C で接続する軌道を計算する。

50

等加速度軌道 A では、2 足方向ロボットが無理なく実現できる最高加速度を維持するものとする。等加速度軌道 A によって目標 Z M P の移動速度は増速する。目標 Z M P の移動速度が 2 足方向ロボットの最高速度に到達すると、以後は等速度軌道 B を採用する。反対足側の目標 Z M P に接近すると、等減速度軌道 C に切り変える。等減速度軌道 C では、2 足方向ロボットが無理なく実現できる最高減速度を維持するものとする。等減速軌道 C によって目標 Z M P の移動速度はゼロとなる。ゼロになったときに、目標 Z M P が反対足側の目標 Z M P に一致する軌道が計算される。これは、あたかも、電車が加速して最高速度を維持して減速して停止するのと同様であり、無理無駄のかからない運動パターンである。減速して所定位置に停止させる軌道を計算する様々な技術が開発されている。

図 2 (D) は、等加速度軌道と等減速度軌道を含む軌道で接続した目標 Z M P 軌道の一例を示しており、点 P 1 5 に示すように、両足接地状態に移行するのを待ってから目標 Z M P は他方の足側に移動するから、目標 Z M P の変化が早すぎるという問題はない。一方点 P 1 6 に示すように、両足接地状態から片足接地状態に変化するのに先立って、目標 Z M P は片足接地面内の位置に移動しており、目標 Z M P の変化が遅すぎるという問題もない。図 2 (E) は、目標 Z M P の移動速度の時間変化を示し、等加速度軌道で増速し、最高速度に達すれば最高速度を維持し、ついで等減速度で減速する。

#### 【0017】

図 2 では、片足接地期間内の目標 Z M P が静止しているとした。しかしながら片足接地期間内の目標 Z M P が静止している必要はなく、例えば、踵方向から爪先方向に移動してもよい。片足接地期間内の目標 Z M P は、接地している足の接地面内にあればよく、人間の場合には、踵方向から爪先方向に移動する。

図 3 は、片足接地期間内に踵方向から爪先方向に移動する目標 Z M P の軌道 (C 1 1、C 1 2、C 1 3) を、等加速度軌道と最高速度の等速度軌道と等減速度軌道によって接続した軌道 C 1 4 を例示している。等加速度軌道は、片足接地期間内に踵方向から爪先方向に移動する目標 Z M P の移動速度で開始し、等減速度軌道は、片足接地期間内の目標 Z M P の移動速度で終了する。目標 Z M P の移動速度は連続的に変化し、不連続な変化が生じない。

図 3 の C 1 5 は、従来の技術で接続した目標 Z M P の軌道を示し、速度が不連続に変動するために、ロボットは大きな加速度または減速度で動作することが求められる

#### 【0018】

図 2、図 3 に例示した軌道は、時間軸に対する X 座標または Y 座標の変化を示す。ここでは、ロボットが最高速度で歩行するものとして時間軸を設定する。等加速度軌道、等速度軌道、等減速度軌道では、ロボットの能力の範囲内で可能な最高加速度、最高速度、最高減速度で計算する。

歩行指令データ作成装置 1 で作成されたデータは、時間軸を引き伸ばしてロボットに教示されることがある。例えば、時間軸に対して図 4 (A) に例示されるパターンで設定された目標 Z M P 軌道を、図 4 (B) に示すように、徐々にゆっくりしたパターンに変換してロボットに教示することがある。この場合、ロボットの動作は徐々に緩やかになる。歩行指令データ作成装置 1 で作成された 1 秒分のデータを、2 秒分のデータとしてロボットに教示すると、ロボットの動作速度は半分に低下する。あるいは、ロボットに教示された歩行指令データを実行する段階で、時間軸を引き伸ばして実行することによって動作をゆっくりさせることもある。歩行指令データ作成装置 1 で作成した段階では、等加速度軌道、等速度軌道、等減速度軌道であったものが、ロボットの実際の動作段階では、等加速度軌道、等速度軌道、等減速度軌道にならないことがある。本技術は、最高速度で想定する目標 Z M P 軌道の算出に用いられるものであり、その段階で、等加速度軌道、等速度軌道、等減速度軌道で接続することが重要であり、ロボットの実際の動作段階では、等加速度軌道、等速度軌道、等減速度軌道にならなくてもかまわない。

#### 【0019】

歩行指令データ作成装置 1 は、オペレータが入力した 6 種のベクトルに基づいて 2 足歩行ロボットの動力学計算をして、実際に生じるであろう Z M P を演算する装置 2 を備えてい

10

20

30

40

50

る。ここでは、オペレータが入力した6種のベクトルの時系列で記述される動作を実現することによって発生する慣性力を計算し、これと重力とから、路面からロボットに作用する反力によるモーメントがゼロとなる位置を計算する。

計算されたZMPは、比較装置3によって、目標ZMPと比較される。ここで用いられる目標ZMPは、装置6によって接続されたものであり、図5(C)に例示されるように、時間に対して滑らかに変化する。

#### 【0020】

計算されたZMPと目標ZMPが不一致であれば、オペレータが入力した6種のベクトルの時系列に無理があることになる。そこでこの実施例では、装置4によって、体幹位置ベクトルPを修正する。ここでは、計算されたZMPが目標ZMPに接近する側に体幹位置ベクトルPを修正する。ZMP演算部2は、修正された体幹位置ベクトルPを用いて、再度ZMPを演算しなおす。計算されたZMPと目標ZMPがほぼ一致するまで、上記のサイクルを繰り返す。

10

#### 【0021】

計算されたZMPが目標ZMPにほぼ一致するように体幹位置ベクトルPが修正されると、修正された体幹位置ベクトルPと、入力された5ベクトルと、入力されて接続処理された目標ZMPによって、ロボットを歩行させられることになる。即ち、動力学的に成立する歩行指令データが作成されたことになる。そこで修正された体幹位置ベクトルPと、入力された5ベクトルと、入力されて接続処理された目標ZMPによって、歩行指令データが完成するので、これを記憶する(装置5)。完成された歩行指令データは、2足歩行ロボットにティーチングされる。

20

#### 【0022】

次に2足歩行ロボットの機械的構造を、図6～18を参照して説明する。本明細書では、足部の前後方向(ロボットの進行方向)をX軸とし、左右方向をY軸とし、垂直軸をZ軸とする。各軸は相互に直交している。図6は本実施例の2足歩行ロボットの両下肢の正面図であり、図7は左下肢の側面図であり、図8は足首関節の構造を説明するための図であり、図9はアクチュエータの詳細を説明する図であり、図10～13は足部の動きを説明する図である。なお、左右の下肢形状は鏡対称である

#### 【0023】

図6に示すように、本実施例のロボット10の左右の下肢12は、大腿部14と下腿部(脛)16と足部18から構成され、大腿部14と胴体部20は股関節22によって接続されており、大腿部14と下腿部16は膝関節24によって接続されており、下腿部16と足部18は足首関節26によって接続されている。

30

#### 【0024】

最初に股関節22について説明する。ほぼ水平に伸びる板状の骨盤部28には、図7に示すように、Z軸回りに回転する円板36がベアリング34によって取付けられている。円板36は、図6において左右に一对設けられている。各円板36の中心には、骨盤部28側から大腿部14側に伸びる(Z軸方向に伸びる)シャフト30が固定されている。シャフト30は骨盤部28に対してZ軸回りに回転する。板状の骨盤部28には、体幹が固定されている。

40

シャフト30の下端に対して大腿部14の上端がユニバーサルジョイント32によって接続されている。ユニバーサルジョイント32は、十字型自在継手を備えており、シャフト30に対して大腿部14がX軸回りとY軸回りに回転することを許容する。股関節22は、骨盤部28に対してZ軸回りに回転できるシャフト30と、シャフト30に対して大腿部14がX軸回りとY軸回りに回転することを許容するユニバーサルジョイント32を持ち、X、Y、Z軸のそれぞれの回りに回転することを許容する3軸関節である。

#### 【0025】

次に膝関節24を説明する。各大腿部14の下端にはY軸方向に平行に並ぶ2つのフランジ40が下方へ伸びており、各下腿部16を構成するシャフト42の上端にはY軸方向に平行に並ぶ2つのフランジ44が上向きに設けられている。膝関節24は、これらのフラ

50

ンジ 40, 44 を貫通して Y 軸方向に伸びる軸 46 を備える。膝関節 24 は、大腿部 14 に対して下腿部 16 が Y 軸回りに回転することを許容する。

【0026】

次に足首関節 26 を説明する。図 8 は足首関節 26 の構造を説明するために単純化してデフォルメした図であり、実際の形状や寸法とは必ずしも一致しない。下腿部 16 のシャフト 42 の下部には X 軸方向に平行に並んだ 2 つのフランジ 58 が下方に伸びている。また、足部 18 の上面には Y 軸方向に平行に並んだ 2 つのフランジ 60 が上方に伸びている。これら下腿部 16 のフランジ 58 と足部 18 のフランジ 60 は十字型自在継手 62 によって接続されてユニバーサルジョイントを成している。足首関節 26 は、下腿部 24 に対して足部 18 が、X 軸回りと Y 軸回りに回転することを許容する。即ち、足首関節 26 は X, Y 軸のそれぞれについて自由度を持つ 2 軸関節である。

10

【0027】

各関節はワイヤによって駆動される（股関節の Z 軸回りの回転を除く。この回転のみはワイヤを利用せずに、モータで直接に回転される）。各ワイヤの一端は末端側部材に取付けられており、他端はモータと送りネジから構成されるアクチュエータに接続されている。モータによって送りネジ（Z 方向に伸びる）が回転すると、送りネジに螺合しているナットが送りネジ方向に送られ、ナットに接続されているワイヤ先端が Z 軸方向に進退する。ワイヤ先端を Z 軸方向に進退させることによってワイヤによって末端側部材を引いたり緩めたりすることができる。

【0028】

最初に図 7 と 8 を参照して足首関節を回転させるワイヤ群を説明する。足部 18 には、図示しない取付け板によってワイヤ終端ガイド 70a, 70b, 70c が固定されている。各ワイヤ終端ガイド 70a, 70b, 70c は円弧形状であり、それぞれの円弧の中心軸は Y 軸方向に伸びており、円弧面は所定の中（Y 軸に沿って伸びる距離）を有している。ワイヤ終端ガイド 70a は足首関節 26 の Y 軸よりも前方に位置し、X 軸上配置されている。その円弧面は X 軸前方を向いている。ワイヤ終端ガイド 70b, 70c は足首関節 26 の Y 軸よりも後方に位置している。ワイヤ終端ガイド 70b は足首関節 26 の X 軸よりも外側に位置し、ワイヤ終端ガイド 70c は足首関節 26 の X 軸よりも内側に位置している。ワイヤ終端ガイド 70b, 70c の円弧面は X 軸後方を向いている。

20

3 本のワイヤ 66a, 66b, 66c の下端は、ワイヤ終端ガイド 70a, 70b, 70c のそれぞれの下端のワイヤ接続点 72a, 72b, 72c に固定されており、各ワイヤ 66a, 66b, 66c の他端は、膝関節 24 側に伸びている。各ワイヤ終端ガイド 70a, 70b, 70c の円弧面はワイヤ 66a, 66b, 66c が小さな曲率半径で鋭く曲がることを禁止している。

30

【0029】

ワイヤ接続点 72a は足首関節 26 の Y 軸よりも前方に位置しており、ワイヤ 66a が膝関節 24 側に引かれると足部 18 は足首関節 26 の Y 軸回りに回転して爪先を持ち上げる。ワイヤ接続点 72a は足首関節 26 の X 軸上に配置されており、ワイヤ 66a が膝関節 24 側に引かれても足部 18 の X 軸回りの回転角には影響しない。ワイヤ接続点 72b は足首関節 26 の X 軸よりも外側に位置しており、ワイヤ 66b が膝関節 24 側に引かれると足部 18 は足首関節 26 の X 軸回りに回転して足部 18 の外側を持ち上げる。ワイヤ接続点 72c は足首関節 26 の X 軸よりも内側に位置しており、ワイヤ 66c が膝関節 24 側に引かれると足部 18 は足首関節 26 の X 軸回りに回転して足部 18 の内側を持ち上げる。足部 18 の内側を持ち上げる場合には、ワイヤ 66c を引くと同時にワイヤ 66b を緩めて足部 18 の外側が下がることを許容する。同様に、足部 18 の外側を持ち上げる場合には、ワイヤ 66b を引くと同時にワイヤ 66c を緩めて足部 18 の内側が下がることを許容する。足部 18 を足首関節 26 の X 軸回りに回転させる場合にはワイヤ 66a を操作する必要はない。ワイヤ 66b, 66c を同時に引くと足部 18 は足首関節 26 の Y 軸回りに回転してかかとを持ち上げる。この場合には、ワイヤ 66a を緩めて爪先が下がるのを許容する。ワイヤ 66a を引いて爪先を持ち上げるときには、ワイヤ 66b, 66c

40

50

を緩めてかかるとが下がるのを許容する。

3本のワイヤ66a、66b、66cによって、足首関節26のX軸回りの回転角とY軸回りの回転角を独立に調整することができる。

【0030】

なお、ワイヤ接続点を足首関節26のY軸よりも前方のX軸の両側と、Y軸よりも後方のX軸上に配置してもよい。このようにワイヤ接続点を配置しても、ワイヤによって足首関節26のX軸回りの回転角とY軸回りの回転角を独立して調整することができる。

【0031】

図10～13は足部18の動きを説明するための模式図であり、図10と図11はX軸回りの回転を説明するための図である。図10は足部18の平面図であり、図11は足部18の背面図である。各ワイヤ66a、66b、66cの終端ではワイヤ終端ガイド70a、70b、70cの図示を省略し、ワイヤ接続点72a、72b、72cのみで示してある。

10

【0032】

図10は、ワイヤ接続点72aに接続されているワイヤ（図示省略）は中立状態を維持しながらワイヤ接続点72bに接続されているワイヤ66bの有効長を収縮させ、ワイヤ接続点72cに接続されているワイヤ66cの有効長を伸長させることを示している。このとき、足部18は図11の破線で示したようにX軸回りに矢印の方向に回転する。また、ワイヤの有効長の伸長・収縮を逆にすると、足部18は矢印とは逆方向に回転する。即ち、このようにワイヤの有効長の伸長・収縮を調整することによって、足部18をX軸の回りに自在に回転させることができる。

20

【0033】

図12と図13はY軸回りの回転を説明するための図である。図12は足部18の平面図であり、図13は足部18の側面図である。各ワイヤ66a、66b、66cの終端ではワイヤ終端ガイド70a、70b、70cの図示を省略し、ワイヤ接続点72a、72b、72cのみで示してある。図12はワイヤ接続点72aに接続されているワイヤ66aの有効長を収縮させ、ワイヤ接続点72b、72cに接続されているワイヤ66b、66cの有効長を共に伸長させた場合を示している。このとき、足部18は図13の破線で示すように、Y軸回りに矢印の方向に回転する。また、ワイヤの有効長の伸長・収縮を逆にすると、足部18は矢印と逆方向に回転する。このようにワイヤの有効長の伸長・収縮を調整することによって、足部18をY軸の回りに自在に回転させることができる。

30

なお、足部18の前側を持ち上げるのに要するワイヤの張力に比べ、足部18の後ろ側を持ち上げるのに要するワイヤの張力は大きい。このため、3点のワイヤ接続点72a、72b、72cのうちの1点を前側にし、2点を後側にし、2本のワイヤと2個のアクチュエータでかかとを持ち上げることが好ましい。この場合、各アクチュエータの能力を等しくすることができる。

【0034】

なお図示はしないが、足部18を同時にX軸回りにもY軸回りにも回転させることができる。例えば、ワイヤ66bの有効長を速度 $a-b$ で収縮させ、ワイヤ66cの有効長を速度 $a+b$ で伸長させ（即ち $-a-b$ で収縮させる）、ワイヤ66aの有効長を $b$ で収縮させると、足部18はX軸の回りに速度 $a$ で回転して外側が上がり、且つ、Y軸の回りに速度 $b$ で回転して前側が上がる。このように3本のワイヤの有効長を同時に調整すると、足部18をX軸の回りとY軸の回りに同時に自在に回転させることができる。またX軸回りの回転速度とY軸回りの回転速度を自在に調整することもできる。これらのことから、X、Yの2軸に対して3本のワイヤ、即ち、軸数+1本のワイヤを用いることによって、X、Y軸について互いに独立に調整することが可能である。

40

【0035】

図8に示すように、下腿部16のシャフト42の上部には、フランジ44を貫通するY軸方向の軸46の回りに自由回転可能な3つのプーリ64a、64b、64cが2つのフランジ44と交互に配されている。それぞれのプーリ64a、64b、64cにはワイヤ6

50

6 a, 6 6 b, 6 6 c が 1 本ずつ巻かれている。ワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c は、プーリ 6 4 a, 6 4 b, 6 4 c の前側でプーリから離反している。ワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c は足部 1 8 に対して膝関節の前方位置から引張力を加える。このために、3 本のワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c を同時に同一速度で収縮させると、下腿部 1 6 に対する足部 1 8 の回転角度は変えないで（足首関節 2 6 を回転させないで）、下腿部 1 6 を膝関節 2 4 の回りに前向きに回転させることができる。

#### 【0036】

図 8 に明瞭に示されている 3 本のワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c の上端はアクチュエータ 6 8 a, 6 8 b, 6 8 c（図 6、図 7 参照）に接続されている。図 6 と 7 では図示の明瞭化のためにアクチュエータが簡略化されて表示されている。図 9 はアクチュエータ 6 8 の詳細を模式的に示しており（すべてのアクチュエータは同様の構造を有するために、添え字を省略して共通的に説明する）、一对のフランジ 1 0 2 と 1 0 6 が 3 本の案内ロッド 1 0 8, 1 1 0, 1 1 2 で接続されている。一对のフランジ間には送りネジ 1 2 0 が回転自在で軸方向には移動不能に配置されている。送りネジ 1 2 0 は、モータ 1 1 4 とギヤ 1 1 6 と 1 1 8 によって回転させられる。可動プレート 1 0 4 は送りネジ 1 2 0 に螺合するナットを備えている。可動プレート 1 0 4 は案内ロッド 1 0 8, 1 1 0, 1 1 2 に案内されて軸方向に移動可能で回転不能となっている。その可動プレート 1 0 4 にワイヤ 6 6 の先端が固定されている。

モータ 1 1 4 が回転すると送りネジ 1 2 0 が回転して可動プレート 1 0 4 が案内ロッドに沿って滑り、ワイヤ 6 6 が引き込まれたり、緩められたりする。

アクチュエータ 6 8 のモータは 1 1 4 と、一对のフランジ 1 0 2、1 0 6 は大腿部 1 4 に固定されている。案内ロッド 1 0 8, 1 1 0, 1 1 2 は大腿部 1 4 の長手方向に伸びており、モータは 1 1 4 がアクチュエータ 6 8 を回転させることで、ワイヤ 6 6 は大腿部 1 4 の長手方向に引かれたり緩められたりする。

ワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c のプーリ 6 4 a, 6 4 b, 6 4 c と接続点 7 2 a, 7 2 b, 7 2 c 間の距離をワイヤの有効長とすると、ワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c の有効長はモータ 1 1 4 によって伸長させられる。ワイヤ 6 6 a, 6 6 b, 6 6 c の有効長を伸長させるアクチュエータ群 6 8 a, 6 8 b, 6 8 c は、股関節 2 2 に近い大腿部 1 4 に配置されている。

#### 【0037】

図 9 に示されているように、アクチュエータ 6 8 にコントローラ 2 0 0 が接続されている。コントローラ 2 0 0 には、ロボット 1 0 の動き全体を制御している別のコントローラ（図示省略）から、足首関節 2 6 の回転角と各ワイヤ（6 6 a、6 6 b、6 6 c）の張力を指示する信号が入力される。コントローラ 2 0 0 は、モータ 1 1 4 の回転角及び／またはトルクを制御する。

#### 【0038】

図 7 に示されているように、下腿部 4 2 には下腿部 4 2 を膝関節 2 4 の回りに後方に回転させるワイヤ 6 6 d の一端が接続されている。ワイヤ 6 6 d は膝関節に回転自在に配置されているプーリ 6 4 d（図 6 参照）の後方を通してアクチュエータ 6 8 d の可動プレート 1 0 4 に接続されている。アクチュエータ 6 8 d の可動プレート 1 0 4 はモータによって進退する。可動プレート 1 0 4 が進退すると、ワイヤ 6 6 d は引き込まれたり、緩められたりする。

#### 【0039】

以上によって下記の姿勢変化が実現される。

（1）アクチュエータ 6 8 a を縮めてアクチュエータ 6 8 b、6 8 c を緩めることで爪先が上がる。アクチュエータ 6 8 a を緩めてアクチュエータ 6 8 b、6 8 c を縮めることで爪先が下がる。

（2）アクチュエータ 6 8 b を縮めてアクチュエータ 6 8 c を緩めることで足部 1 8 の外側が上がる。アクチュエータ 6 8 b を緩めてアクチュエータ 6 8 c を縮めることで内側が上がる。

10

20

30

40

50

(3) アクチュエータ 68 a、68 b、68 c を縮めてアクチュエータ 68 d を緩めることで下腿部 16 が前方に回転する。アクチュエータ 68 a、68 b、68 c を緩めてアクチュエータ 68 d を縮めることで下腿部 16 が後方に回転する。

4 本のアクチュエータと 4 本のワイヤで、足首関節 26 の X 軸回りの回転角（前記 2 の回転）と、足首関節 26 の Y 軸回りの回転角（前記 1 の回転）と、膝関節 24 回りの回転角（前記 3 の回転）が独立に調整できる。

4 本のアクチュエータで 3 軸回りの回転角を調整するために、アクチュエータは冗長であるように見える。しかしながら、この冗長性を利用して回転角に関する剛性を調整することができる。なおこの点については後記する。

#### 【0040】

膝関節 24 のみならず足首関節 26 の回転角を調整するためのアクチュエータまでもが大腿部 14 に配置されているために、この人工下肢の先端部は軽く、股関節回りの慣性モーメントは小さい。このために、小さなトルクで股関節 22 の回りに高速に回転させることができる下肢が得られる。

#### 【0041】

次に股関節 22 回りの回転角を調整するワイヤとアクチュエータを説明する。図 6 と図 7 に示すように、大腿部 14 の上部の所定位置には 3 個の円弧形状のワイヤ終端ガイド 48 a、48 b、48 c が 3 箇所に取付けられ、それぞれにワイヤ 50 a、50 b、50 c が 1 本ずつ掛けられている。それぞれのワイヤ 50 a、50 b、50 c の下端はそれぞれワイヤ終端ガイド 48 a、48 b、48 c の下端 49 a、49 b、49 c に固定されている。後側に取付けられたワイヤ 50 c の中程にはプーリ 54 が配置され、プーリ 54 は股関節 22 の Y 軸よりも後方に位置している。ワイヤ 50 a、50 b、50 c の上端はそれぞれアクチュエータ 52 a、52 b、52 c の可動プレートに接続されている。アクチュエータ 52 a、52 b のそれぞれの送りネジはそれぞれ図示しないモータによって回転するために、送りネジに螺合している可動プレートはモータの回転によって進退する。この結果、ワイヤ 50 a、50 b、50 c の有効長が伸長・収縮する。なお、アクチュエータ 52 a、52 b、52 c とそのためのモータ 56 等は胴体部に配置されており、股関節 22 の回りに回転する下肢の慣性モーメントを全く増加させない。

#### 【0042】

アクチュエータ 52 a、52 b は、股関節 22 の Y 軸よりも前方に位置しており、収縮すると大腿部 14 を股関節 22 の Y 軸の回りに前方に回転させる。ワイヤ 50 c を案内するプーリ 54 は股関節 22 の Y 軸よりも後方に位置しており、アクチュエータ 52 c が収縮すると大腿部 14 を股関節 22 の Y 軸の回りに後方に回転させる。なお、骨盤部 28 に回転自在な円板 36 はモータ 38 によって Z 軸の回りに回転させられる。モータ 38 は骨盤部 28 に固定されている。

#### 【0043】

ワイヤ接続点 49 c は股関節 22 の Y 軸よりも後方に位置しており、ワイヤ 50 c が引かれると大腿部 14 は股関節 22 の Y 軸回りに後方に回転する。ワイヤ接続点 49 c は股関節 22 の X 軸上に配置されており、ワイヤ 50 c が引かれても大腿部 14 の X 軸回りの回転には影響しない。ワイヤ接続点 49 a は股関節 22 の X 軸よりも外側に位置しており、ワイヤ 50 a が引かれると大腿部 14 は股関節 22 の X 軸回りに回転して大腿部 14 を開ける。ワイヤ接続点 49 b は股関節 22 の X 軸よりも内側に位置しており、ワイヤ 50 b が引かれると大腿部 14 は股関節 22 の X 軸回りに回転して大腿部 14 を閉じる。大腿部 14 を閉じる場合には、ワイヤ 50 b を引くと同時にワイヤ 50 a を緩めて大腿部 14 が閉じることを許容する。同様に、大腿部 14 を開ける場合には、ワイヤ 50 a を引くと同時にワイヤ 50 b を緩めて大腿部 14 が開くことを許容する。大腿部 14 を股関節 22 の X 軸回りに回転させる場合にはワイヤ 50 c を操作する必要はない。ワイヤ 50 a、50 b を同時に引くと大腿部 14 は股関節 22 の Y 軸回りに前方に回転して大腿部 14 を持ち上げる。この場合には、ワイヤ 50 c を緩めて大腿部 14 が前方に回転するのを許容する。ワイヤ 50 c を引いて大腿部 14 を後方に回転させる場合には、同時にワイヤ 50 a、

10

20

30

40

50

50bを緩めて大腿部が下がるのを許容する。

【0044】

以上によって股関節22は下記のように調整される。

(1) アクチュエータ52cを縮めてアクチュエータ52a, 52bを緩めることで大腿部14は後方に回転する。アクチュエータ52cを緩めてアクチュエータ52a, 52bを縮めることで大腿部14が前方に回転する。大腿部14を前方に持ち上げるには大きなトルクが必要とされるのに対し、後方に下げるには大きなトルクが要らない。大きなトルクが必要とされる側に2本のアクチュエータと2本のワイヤが利用され、小さな力しか必要とされない側に1本のアクチュエータと1本のワイヤが利用されている。

(2) アクチュエータ52aを縮めてアクチュエータ52bを緩めることで大腿部14が外向きに持ち上げられる。アクチュエータ52aを緩めてアクチュエータ52bを縮めることで大腿部14が閉じる。

3本のアクチュエータと3本のワイヤで、股関節22のX軸回りの回転角(前記2の回転)と、股関節22のY軸回りの回転角(前記1の回転)が独立に調整できる。

【0045】

股関節22の回りに大腿部14を動かすためのアクチュエータは胴体側に配置されているために、大腿部14を動かす際にはアクチュエータごとに動かす必要がない。股関節22回りの慣性モーメントは小さい。このために、小さなトルクで股関節22の回りに下肢を高速に回転させることができる。

【0046】

図8に明瞭に示されている3本のワイヤ66a, 66b, 66c等の中間部には、図14、図15に示す非線形バネ140が挿入されている。バネ140はバネ鋼で形成されており、平板部122と一对のフランジ126, 126ともう一对のフランジ対130, 130を備えている。フランジ対126, 126間にはシャフト128が差し渡され、フランジ対130, 130間にはシャフト132が差し渡されている。平板部122には、シャフト128, 132と平行に伸びる峰部124が形成されている。ワイヤ66は、屈曲しながら、シャフト128の下方、峰部124の上方、シャフト132の下方を通過している。

図16に示されるように、ワイヤ66が強く引かれると、バネ鋼製の平板部122が撓んでワイヤ66は引き伸ばされる。

【0047】

上記のバネ140がワイヤに挿入されているために、アクチュエータによってワイヤ張力を調整することができる。

図6において、アクチュエータ68bの引き込み量とアクチュエータ68cの引き込み量が等しく、足部18はX軸回りに下腿部16のシャフト42に直角に調整されているとする。この状態から、アクチュエータ68bとアクチュエータ68cを同一速度でさらに引き込むとする。この場合、ワイヤ66bとワイヤ66cは同一速度で引き込まれるために、足部18はX軸の回りに回転しない。しかしながら、ワイヤ66bとワイヤ66cが引き込まれるのに応じて、図16に示すように、バネ140が変形し、ワイヤ66bとワイヤ66cの張力は増大する。即ち、このロボットは、2本のワイヤの一方を引いて時計方向に回転させ、他方のワイヤを引いて反時計方向に回転させる方式であるために、両方のワイヤを同時に引き込むことによって、回転角を変えないで、ワイヤ張力のみを増大させることができる。同様に、両方のワイヤを同時に緩めることによって、回転角を変えないで、ワイヤ張力のみを減少させることができる。

【0048】

ワイヤ張力は関節回りの回転角の剛性を決定する。例えば、図6の足部18が地面に接地する場合、両ワイヤの張力が弱くて剛性が低ければ、接地した地面が足部の左側で高く右側で低い場合に、足部18の右側を引き上げているワイヤが伸びて足部18が地面の傾斜に倣って傾斜して足部18の全体が接地する。剛性が低ければ外部事象に柔軟に従従する。

10

20

30

40

50

一方において、片側の足部 18 が空中にある場合、その空中姿勢を調整する両ワイヤの張力が弱くて剛性が低ければ、ロボットにわずかな外力が作用することでワイヤが伸びるために空中姿勢が不安定となる。姿勢を安定させるためには、剛性が高い方が好ましい。剛性が高い状態の方が、アクチュエータの動きと関節回りの回転角が良く一致し、関節回りに高速で回転ないし動作させることができる。

#### 【0049】

この実施例のロボットは、2本のワイヤのうち的一方を引いて時計方向に回転させ、他方のワイヤを引いて反時計方向に回転させる方式（プルプル方式）であり、しかも、ワイヤの中間部に非線形バネを挿入しているために、ロボット姿勢とは独立に剛性を調整できる。柔軟に追従することが必要な時には低剛性とし、姿勢を安定させることが必要な時には高剛性に調整することができる。

10

#### 【0050】

プルプル方式と非線形バネとによって、関節回りの剛性を調整できる理由を、図17、図18を参照しながら説明する。なお、この説明では、2本のワイヤによって足部がY軸回りに回転する簡単な例を取り上げて説明する。図17は、このような構成を模式的に図示したものである。図17に示されているように、足部302は円筒状のプーリ303と一体化されている。プーリ303は、Y軸303cの回りに回転可能に軸支されている。前方ワイヤ304と後方ワイヤ306はプーリ303に巻き付けられ、それぞれの一端はワイヤ接続点303a、303bでプーリ303に接続されている。前方ワイヤ304と後方ワイヤ306の他端は、それぞれ前方アクチュエータ312と後方アクチュエータ314に接続されている。前方アクチュエータ312と後方アクチュエータ314は、固定部材322、324に固定されている。アクチュエータ312、314は、ワイヤ304、306を引き込んだり、緩めたりする。ワイヤ304、306の途中には、前方非線形バネ305と後方非線形バネ307が装着されている。

20

#### 【0051】

図18は、前方非線形バネ305と後方非線形バネ307のバネ特性を示すグラフである。縦軸（y軸）はバネ力を示し、横軸（x軸）はバネの伸び量を示している。y軸の右側のカーブが後方非線形バネ307のバネ特性を表し、y軸の左側が前方非線形バネ305のバネ特性を表している。図18から明らかなように、前方非線形バネ305と後方非線形バネ307のバネ特性は、その伸びが大きくなると急にバネ力が大きくなる（カーブの傾斜が急になる）非線形性を有している。すなわちフックの法則には従わない。

30

図18を用いて、足部302の回転軸303c回りの剛性が調整される様子を具体的に説明する。例えば、バネ305、307の伸び量がゼロで足部302の角度が所定位置に調整されたときのアクチュエータ312、314の作動量からアクチュエータ312、314がさらにA（mm）づつ引き込まれとする。するとバネ305、307が伸び、B（kg）のバネ力が発生する（点D、点F参照）。ワイヤ張力はB（kg）に調整される。前方ワイヤ304と後方ワイヤ306の張力は等しいので、足部302は回転せず、調整された位置を保つ。この状態で足部302に時計方向のモーメントを加えて回転させ、後方バネ307がC（mm）伸びたとする（点D→点E）。一方、後方バネ307がC（mm）伸びると、これと等しい量（C（mm））前方バネ305は縮む（点F→点G）。従って、足部302を回転させてバネ（305、307）をC（mm）伸縮させるのには、点Eと点Gのバネ力の差であるH（kg）の力をプーリ303に加える必要がある。

40

#### 【0052】

アクチュエータ312、314が大きくJ（mm）づつ引き込まれたとする（点L、点M）。このときにバネ305、307が発生するバネ力はK（kg）である。この場合でも、ワイヤ304、306の張力は等しいので、足部302は回転せずにそのままの位置を保つ。この状態で足部302に時計方向のモーメントが加わって、後方バネ307がC（mm）伸びたとする（点L→点N）。前方バネ305はC（mm）縮む（点M→点P）。従って、足部302を回転させてバネ307、305をC（mm）伸縮させるのには、点Nと点Pのバネ力の差であるQ（kg）の力をプーリ303に加える必要がある。

50

## 【0053】

アクチュエータ312、314がA (mm) 引き込まれて実現された張力Bの状態からバネ307、305をC (mm) 伸縮させるのに必要な力は、H (kg) である。アクチュエータ312、314がJ (mm) 引き込まれて実現された張力Kの状態からバネ307、305をC (mm) 伸縮させるのに必要な力は、Q (kg) である。明らかにQ (kg) の方が、H (kg) よりも大きい。すなわち、アクチュエータ312、314を大きく引き込んで、大きな張力をワイヤ304、306に発生させているときの方が、足部302の剛性（足部302を所定角回転させるに要するY軸回りの回転モーメント）は高くなる。アクチュエータ312、314がワイヤ304、306を引き込む量を変化させることによって、足部302の剛性を調整することができる。

10

プルプル方式と非線形バネ組合せて用いると、関節の回転角と独立に、剛性を調整することができる。

## 【0054】

図18のバネ特性グラフの傾斜角が剛性に比例する。そこで、その傾斜角が意図した剛性に相当するバネの伸び量を求め、その伸び量を与えることで、意図した剛性に調整することができる。

ロボットの姿勢にかかわらず、回転中心からワイヤにおろした垂線の長さ、即ちモーメントの腕の長さがほぼ一定であれば、剛性から張力ないし伸び量を決定することができる。しかしながら、回転中心からワイヤにおろした垂線の長さ、即ちモーメントの腕の長さが増減する場合には、剛性から張力を決定するまでの間にモーメントの腕の長さを考慮しなければならない。例えば、ともにワイヤ張力が1 kg であるとする。このとき、回転中心からその1 kg の張力の作用点までの長さが10 cm (ケース1) と20 cm (ケース2) とする。このとき、ケース2の方がモーメントの腕の長さが長く、モーメントも大きい。ケース2の方が、同じ張力でありながら、外力に抗して関節回転角を所定値に維持する程度は強い。剛性は、張力とモーメントの腕の長さによって決まる。

20

コントローラ200は、剛性が指定されたときに、指定された剛性とそのときのモーメントの腕の長さから指定された剛性に調整するのに必要な張力を計算し、次いで、その張力に調整するのに必要なワイヤの伸びの長さを計算する。ロボットの姿勢と独立して関節回りの柔軟性を指定された剛性に調整することができる。

足首関節26のX軸回りの回転角度は、アクチュエータ68bによるワイヤ66bの引き込み量によって決定され、ワイヤ66cは冗長である。本実施例では冗長な、アクチュエータ68cによるワイヤ66cの引き込み量を利用して、足首関節26のX軸回りの回転に対する剛性を制御する。

30

足首関節26のY軸回りの回転角度は、アクチュエータ68aによるワイヤ66aの引き込み量によって決定され、ワイヤ66bとワイヤ66cは冗長である。本実施例では、冗長な、アクチュエータ68bによるワイヤ66bの引き込み量とアクチュエータ68cによるワイヤ66cの引き込み量を利用して、足首関節26のY軸回りの回転に対する剛性を制御する。

膝関節24の回りの回転角度は、アクチュエータ68a、68b、68cによって決定され、ワイヤ66dは冗長である。本実施例では、冗長な、アクチュエータ68dによるワイヤ66dの引き込み量を利用して、膝関節24の回りの回転に対する剛性を制御する。

40

股関節22のX軸回りの回転角度は、アクチュエータ52aによるワイヤ50aの引き込み量によって決定され、ワイヤ50bは冗長である。本実施例では、冗長な、アクチュエータ52bによるワイヤ50bの引き込み量を利用して、股関節22のX軸回りの回転に対する剛性を制御する。

股関節22のY軸回りの回転角度は、アクチュエータ52cによるワイヤ50cの引き込み量によって決定され、ワイヤ50aとワイヤ50bは冗長である。本実施例では、冗長な、アクチュエータ52aによるワイヤ50aの引き込み量とアクチュエータ52bによるワイヤ50bの引き込み量を利用して、股関節22のY軸回りの回転に対する剛性を制御する。

50

## 【0055】

本発明のロボットはワイヤ駆動であり、各関節にアクチュエータを実装する必要がない。アクチュエータを関節から離れた位置に実装することができるため、関節を小型化、軽量化することができ、アクチュエータの実装位置の自由度が上がる。また、本発明の場合、ワイヤ数は2軸の関節に対しては3本、3軸の関節に対しては4本、即ち、1関節に対して軸数+1本でよい。通常であれば、関節の1自由度について2本のワイヤを必要とする。必要なワイヤ本数とアクチュエータ数が少数化するため、四肢等のスリム化や軽量化が図れる。これらのことにより、末端側部材の動きを高速化することができ、外観的にも動作的にも人間や動物に類似したロボットを実現することが可能となる。

## 【0056】

アクチュエータ群は大腿部に配置されることに限られるものではない。例えば、上肢の上腕部にアクチュエータ群を配置し、個々のアクチュエータが動作して上腕に対して前腕が回転されたり、前腕に対して手部が回転されたりするように構成することができる。

上述したアクチュエータのコントローラは、関節の回転角と張力とが入力されているが、張力に代えて関節の剛性を入力するように構成してもよい。

このような構成では、コントローラは、関節の回転角から末端側部材（例えば、足部）の回転中心とワイヤの接続点との間のモーメントアームの長さを計算し、このモーメントアームの長さから関節が所望の剛性となるワイヤの張力を計算する。そして、ワイヤの張力を計算された値とするアクチュエータの作動量がアクチュエータに出力される。モーメントアームが末端側部材の回転にともなって大きく変化する構成（ワイヤ終端ガイドが存在しないような構成）においては、上記のように張力に代えて剛性をコントローラに入力し、これを計算処理することにより、関節の剛性をより正確にコントロールすることができる。

## 【0057】

次に、上記の機械構成を備える2足歩行ロボットの制御装置を説明する。

図19は、ロボットの2足歩行を制御する制御装置の構成を示し、歩行指令データ作成装置1で作成された、体幹位置ベクトルP（これは歩行指令データ作成装置1によってオペレータが入力したものから修正されている）と、体幹姿勢ベクトルRと、左足先位置ベクトルCと、左足先姿勢ベクトルDと、右足先位置ベクトルEと、右足先姿勢ベクトルFを入力し、逆キネマティクス計算する計算装置304を備えている。ただし、体幹位置ベクトルPについては、歩行指令データ作成装置1によって修正されるのみならず、後記する「倒立振り制御」と「ならい制御」を実施するために、さらに修正されて計算装置304に入力される。また、体幹姿勢ベクトルRについても、実際の体幹姿勢ベクトルが目標体幹姿勢ベクトルに一致するように、目標体幹姿勢ベクトルを補正する処理が実施されて計算装置304に入力される。

## 【0058】

計算装置304は、入力された体幹位置ベクトルP（これは修正されている）と、体幹姿勢ベクトルR（これも補正されている）と、左足先位置ベクトルCと、左足先姿勢ベクトルDと、右足先位置ベクトルEと、右足先姿勢ベクトルFに基づいて、入力した各ベクトルで記述される位置と姿勢を実現するのに必要な各関節の回転角 $\theta$ を計算する。回転角は、各関節を回転させるモータの回転量で計算される。図19では、2個のアクチュエータ分しか表示されていないが、すべてのアクチュエータのモータ回転量が計算される。この計算では、逆キネマティクス演算が実施される。

各アクチュエータごとに計算された目標回転量 $\theta$ は、各アクチュエータのためのドライバ306、316に入力される。各ドライバは、目標回転量と実際回転量の偏差に基づいて各アクチュエータのモータ308、318に加えるトルクを調整する。実際回転量は、アクチュエータのモータ毎に設けられているエンコーダ310、320で検出される。このフィードバック制御によって、アクチュエータのモータ308、318は、実際回転量が目標回転量に一致するようにフィードバック制御される。

## 【0059】

10

20

30

40

50

目標 ZMP は、倒立振子モデル 334 に入力される。倒立振子モデル 334 には、実際の体幹位置ベクトル P も入力される。実際の体幹位置ベクトル P は、ロボットの体幹に設けられているジャイロ 328 の信号を演算装置 330 で演算して求められる。

倒立振子モデル 334 は、目標 ZMP と実際の体幹位置ベクトル P を用いて、目標 ZMP から体幹位置ベクトル P に向かう傾斜線の垂直からの傾き  $\phi$  を計算する。計算された  $\phi$  は、ZMP の修正量算出装置 336 に入力される。ZMP の修正量算出装置 336 は、 $\Delta ZMP = k_1 \times \phi + k_2 \times d\phi / dt$  の式によって、ZMP の修正量を算出する。即ち、前記した傾斜角  $\phi$  に比例する値と、傾斜角  $\phi$  の時間微分に比例する値を加算して ZMP の修正量を算出する。算出された ZMP の修正量  $\Delta ZMP$  は、入力された目標 ZMP に加算され、目標 ZMP は  $\Delta ZMP$  だけ修正される。以上のように、目標 ZMP を  $\Delta ZMP$  だけ修正する処理を、通常は倒立振子制御と称している。

10

人間は、歩行する場合、とくに高速で走行する場合には顕著のように、体幹を前方に傾けて走行しやすくする。体幹を前方に傾斜させることで重心を前方に移動させ、前方に移動した重心に追従するように足を前方に移動させる。倒立振子制御は、人間のこの種の制御に対応するものであり、体幹位置を前方に傾ける制御をする。

#### 【0060】

倒立振子モデルで修正された目標 ZMP (340) は、実際の ZMP (326) と比較され、その偏差 (342) が算出される。実際の ZMP (326) は、ロボットの足の裏に設けられている複数の力センサ 322 の出力を演算装置 324 によって演算することで演算される。偏差 342 にはゲイン  $k_3$  が乗じられて体幹位置ベクトル P のディメンジョンに変換される。体幹位置ベクトル P のディメンジョンに変換された偏差  $\Delta P$  は、体幹位置ベクトル P に足し合わされる。目標 ZMP (340) と実際の ZMP (326) の偏差 (342) を体幹位置ベクトル P のディメンジョンに変換して体幹位置ベクトル P に足し合わせる処理を、通常は「ならい制御処理」と称している。

20

#### 【0061】

ロボットが歩行する面には、体幹位置ベクトル P と、体幹姿勢ベクトル R と、左足先位置ベクトル C と、左足先姿勢ベクトル D と、右足先位置ベクトル E と、右足先姿勢ベクトル F と、目標 ZMP を決定する段階では、予期していない凹凸が存在し、ロボットの足が例えば凸を踏むことがある。これは、人間であれば蹴躓くことに相当する。人間はそのとき、膝を曲げて腰の位置を前方に送ることによって転倒しないようにする。ならい制御処理は、人間のこの種の制御に対応するものであり、体幹を前方に平行移動する制御をする。膝を曲げて体幹を前方に平衡移動することによって転倒を防止する場合、そのままでは歩行を続けることができない。転倒を防止したあとには、膝を伸ばして通常の歩行姿勢に復帰することが必要である。倒立振子モデルは、それに相当する制御を実行する。比喩的にいえば、ならいモデルは体の柔軟性に相当し、倒立振子モデルは歩行姿勢の維持力に相当する。

30

#### 【0062】

本実施例では、倒立振子制御系 334 で目標 ZMP を修正し、ならい制御系で目標 ZMP と実際の ZMP の偏差 (342) によって目標体幹位置ベクトル P を修正するにあたって、修正量制限装置 346 を組み込むことによって修正量を制限している。

40

ならい制御モデルで算出した目標体幹位置ベクトルの修正量を  $\Delta P$  とする。入力された体幹位置ベクトル P に修正量  $\Delta P$  をベクトル加算し、それによって逆キネマティクス計算装置 304 で逆キネマティクスを解いて関節角を計算すると、計算された関節角が関節の許容回転範囲を超えてしまうことがある。この場合、ロボットの機械的制約によって、図 19 の制御装置が演算したならい制御を実行することができない。本実施例では、ならい制御ループで算出した目標体幹位置ベクトルの修正量  $\Delta P$  に  $\alpha^n$  を乗じたもので体幹位置ベクトル P を修正する。ここで  $\alpha$  は 0 から 1 の間の数であり、 $n$  は後記する回数であり、 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$  と変化する。

即ち、従来のように一律に  $P + \Delta P$  の式で体幹位置ベクトル P を修正するではなく、 $P + \alpha^n \times \Delta P$  に従って体幹位置ベクトル P を修正する。最初に  $n = 0$  で対応できれば、 $P +$

50

$\alpha^0 \times \Delta P$  ( $= P + \Delta P$ ) で修正する。2 回目の  $n = 1$  で対応できれば、 $P + \alpha^1 \times \Delta P$  で修正する。3 回目の  $n = 2$  で対応できれば、 $P + \alpha^2 \times \Delta P$  で修正する。4 回目の  $n = 3$  で対応できれば、 $P + \alpha^3 \times \Delta P$  で修正する。

具体的処理手順は下記のものである。

- (1) ならい制御モデルで算出した目標体幹位置ベクトルの修正量を  $\Delta P$  とする。
- (2) 最初に  $n = 0$  として、 $P + \alpha^0 \times \Delta P$  ( $= P + \Delta P$ ) で修正する。
- (3)  $P + \Delta P$  で、逆キネマティクスを解いて関節角  $\theta$  を求めた結果、すべての関節で許容回転角内であれば、そこで処理を終了する。
- (4) 前記の (3) で、少なくとも一つの関節について、計算された関節角  $\theta$  が許容回転角外となれば、修正量を低下させる。
- (5) そのために、 $n = 1$  として、 $P + \alpha \times \Delta P$  で修正する。 $\alpha$  は 1 以下であり、修正量は低減される。
- (6)  $P + \alpha \times \Delta P$  で、逆キネマティクスを解いて関節角  $\theta$  を求めた結果、すべての関節で許容回転角内であれば、そこで処理を終了する。
- (7) 前記の (6) で、少なくとも一つの関節について、計算された関節角  $\theta$  が許容回転角外となれば、修正量を低下させる。
- (5) そのために、 $n = 2$  として、 $P + \alpha^2 \times \Delta P$  で修正する。 $\alpha$  は 1 以下であり、修正量は低減される。

以下  $n = 3, 4, 5 \cdots$  としながら、 $P + \alpha^n \times \Delta P$  で修正された体幹位置ベクトル  $P$  を実現するすべての関節回転角  $\theta$  が許容回転角内となるまで、上記手順を繰り返す。

#### 【0063】

$P + \alpha^n \times \Delta P$  と補正することから、 $n = 0$  でない限り、ならい制御は不十分である。しかしながら、ロボットがならい制御を十分に効かせるだけの柔軟性を備えていなければ、ならい制御が不十分となってもやむをえない。ならい制御を十分に効かせた結果、関節回転角が限界まで回転し、限界となってもまだ回転角が不足していると転倒の恐れがある。本実施例のように、関節回転角が限界内で収まるようにならい制御の制御量を低減させるようにすると、ロボットが持つ柔軟性の範囲内でならい制御が実施され、ロボットが転倒する事態を著減することができる。

#### 【0064】

ならい制御は、体の柔軟性に相当する。ならい制御のためのゲイン  $k_3$  (変換装置 344) が大きいほど、ロボットの肢体は柔軟に姿勢を変え、受けるショックを和らげる。従って、着地時等のようにショックを受ける場合には、ならい制御が強く働くことが好ましい。

反面ならい制御が常時に強く働いていると、片足立脚時に慣性力で姿勢が乱れ、着地予定でないタイミングで着地して着地ショックが大きくなることがある。ならい制御のためのゲイン  $k_3$  の値の設定には、上述した相反する要素があり、最適値に調整することが難しい。

#### 【0065】

本実施例では、この相反関係を解決するために、ならい制御のためのゲイン  $k_3$  の値をロボットの状態に合わせて増減する手法を取り入れた。

図 20 の (A) は、歩行パターンの変化等に合わせてならい制御のためのゲイン  $k_3$  を変化させる例を示し、片足接地状態から両足接地状態に切り替わる前後において、ならい制御のためのゲイン  $k_3$  を増大させ、その他のときには低く維持する。この場合、着地ショックを受ける前後ではならい制御がよく効くためにロボットの肢体は柔軟に対応して着地ショックを和らげる。その他のときには、ならい制御のためのゲイン  $k_3$  は小さく、姿勢維持力が高く保たれる。片足立脚時に慣性力で姿勢が乱れることがなく、着地予定でないタイミングで着地するために着地ショックが大きくなることもない。ならい制御のためのゲイン  $k_3$  は、歩行指令データ作成装置 1 で作成される 6 個のベクトルの時系列変化に合わせて増減させることができる。

#### 【0066】

10

20

30

40

50

図20の(B)は、左足裏に設置されている力センサが受ける力を示し、(C)は、右足裏に設置されている力センサが受ける力を示し、(D)は、両センサの受ける力の合計を示している。着地時には、強い慣性力が働くために、合計した力は着地時に大きい。合計した力とならない制御のためのゲイン $k_3$ を比例させれば、着地ショックを受けるときにならぬ制御のためのゲイン $k_3$ を大きくし、その他のときには低く維持することができる。図19の力センサ322の信号を演算する装置324から、変換装置344に伸びる処理360は、力センサ322が受ける力の合計力に、ならぬ制御のためのゲイン $k_3$ を比例させる処理を示している。

なお、ならぬ制御を強く働かせる場合に、倒立振子モデルのゲイン $k_1$ 、 $k_2$ を同時に増大させてもよいが、ならぬ制御のためのゲイン $k_3$ のみを大きくしてもよい。

10

#### 【0067】

倒立振子モデルでは、目標ZMPから体幹位置ベクトルPに向かう傾斜線の垂直からの傾き $\phi$ を計算する(図19の334参照)。計算された $\phi$ は、ZMPの修正量算出装置336に入力され、 $\Delta ZMP = k_1 \times \phi + k_2 \times d\phi / dt$ の式によって、ZMPの修正量 $\Delta ZMP$ を算出する。ロボットが円滑に歩行するには、ゲイン $k_1$ と $k_2$ の値を適当な値に調整する必要がある。さらには、ならぬ制御のためのゲイン $k_3$ も適当な値に調整する必要がある。

ゲイン $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ の値を歩行制御に適当な値に調整しておく、と、ロボットが歩行しないで静止しているあいだにも、ロボットが体幹を前方に傾けてからそれを修正する動作を繰り返すことが生じる。ここではそれを自励振動という。自励振動が生じると、ロボットの動力が無駄に消費されて不都合である。

20

これを解消するために、ロボットが歩行しないで静止している間は、ZMPの修正量 $\Delta ZMP$ を算出する $k_1 \times \phi + k_2 \times d\phi / dt$ の式に用いるゲイン $k_1$ 、 $k_2$ の値を、歩行時に適当な値よりも下げることが有効であることがわかった。この場合、ならぬ制御のためのゲイン $k_3$ も同時にさげてもよいが、ゲイン $k_1$ 、 $k_2$ の値を下げれば、ならぬ制御のためのゲイン $k_3$ は下げなくてもすむ。ロボットが歩行しないで静止している間に、ゲイン $k_1$ 、 $k_2$ (さらにはゲイン $k_3$ )の値を下げて、ロボットは直立しつづけることが確認されている。自励振動に無駄に動力が消費されることがない。

図19では、力センサ322の信号を演算する装置324によって、ロボットが静止しているか歩行しているかを判別し、その結果によってゲイン $k_1$ 、 $k_2$ を切替えることを図示している。

30

#### 【0068】

この実施例のロボットは、2本のワイヤのうちの一方を引いて時計方向に回転させ、他方のワイヤを引いて反時計方向に回転させる方式(プルプル方式)であり、ワイヤの中間部に非線形バネを挿入しているために、ロボット姿勢とは独立に剛性を調整できる。この特性を活用し、歩行時に剛性を変化させながら歩行するのが有効である。

着地中には、予期しない凹凸を踏んでいることがあり、下肢が柔軟な方が予期しない凹凸の影響を受けにくい。剛性を高めて指示された姿勢に忠実に制御すると、予期しない凹凸の影響を吸収できないためにロボットがスリップしたり転倒したりする恐れがある。

そこで、本実施例では、歩行パターンの進行に合わせて剛性を変化させる。ここでは、左右の下肢の剛性を別々に変化させる。

40

図21(A)は、歩行パターンと左右の下肢の剛性の変化パターンを示し、左右の下肢とも、接地中は剛性が低く維持されて、空中移動している間は高く保たれる。左足接地状態から両足接地状態に移行する直前タイミングで右下肢の剛性が下げられ、右足接地状態から両足接地状態に移行する直前タイミングで左下肢の剛性が下げられる。左下肢の剛性と右下肢の剛性は別々に制御される。接地中の下肢の剛性が低いために、予期しない凹凸を踏んでも、接地した下肢が柔軟に対応して凹凸の影響を吸収する。一方、空中にある足の剛性は高く維持され、姿勢維持力が高く保たれる。片足立脚時に慣性力で姿勢が乱れることがない。

剛性の変化パターンには、図21の(A)～(C)に例示する種々のバリエーションが存

50

在する。

(A) 左下肢の剛性を、左足接地状態と両足接地状態の間は低め、右足接地状態の間は高める。右下肢の剛性を、右足接地状態と両足接地状態の間は低め、左足接地状態の間は高める。

(B、C) 左下肢の剛性を、右足接地状態から両足接地状態に移行する直前タイミングで下げ、次の右足接地状態までの間に高める。右下肢の剛性を、左足接地状態から両足接地状態に移行する直前タイミングで下げ、次の左足接地状態までの間に高める。

(B) 下肢の剛性を連続的に上昇させる。

(C) 下肢の剛性を階段状に上昇させる。

いずれの変化パターンによっても、接地した下肢が柔軟に対応して凹凸の影響を吸収する一方、空中にある足の剛性は高く維持され、姿勢維持力が高く保たれる。

10

#### 【0069】

以下では、図19の制御装置によって、経時的に変化する目標回転角と、経時的に変化する剛性に関する指示値に追従するようにアクチュエータを制御する技術を説明する。以下では、アクチュエータ68bと68cによって、足首関節26のX軸回りの回転角と剛性を、指示された回転角と剛性に追従するように制御する例について説明する。

#### 【0070】

(第1の制御技術)

図22は、足首関節26をワイヤ66bによってX軸回りに外向きに回転させるアクチュエータ68bのためのコントローラ200bの制御ブロック図と、ワイヤ66cによって内向きに回転させるアクチュエータ68cのためのコントローラ200cの制御ブロック図を示す。これは、図19のドライバ306と316の詳細に対応する。この場合、逆キネマティクス計算装置304は、関節の回転に対する剛性も指示する。剛性の指示値は、経時的に変化する。

20

最初にコントローラ200bについて説明する。第1変換機2bは、足首関節26の回転角の指示値P1から、その回転角の指示値P1を実現するのに必要なモータ114bの回転角P2に変換する。ここでは、バネ140が伸びないものとして計算する。計算された回転角P2は、モータ114bの実際の回転角P7と比較されて偏差P3が求められる。モータ114bの実際の回転角P7は、モータ114bに内蔵されているエンコーダ115bから得られる。第2変換機4bは、回転角偏差P3をモータ114bの回転速度P4に変換する。ここでは、偏差P3が大きいほど大きな回転速度P4に変換する。偏差P3がゼロであれば回転速度P4もゼロである。第3変換機6bは、モータ114bの回転速度P4をモータ114bに加えるトルクP5に変換する。モータ114bは、通電する電流値と発生するトルクが比例する特性を備えている。モータ114bに加えるトルクP5は電流の単位で指令される。電流の単位で指令されるトルクP5は、指示された回転角と実際の回転角との偏差に基づいてアクチュエータのトルクをフィードバック制御するトルクの増減値に相当し、指示された回転角に対して不十分なアクチュエータのトルクを増大させ、指示された回転角に対して過大なアクチュエータのトルクを減少させる。これによって、実際の回転角が指示された回転角にフィードバック制御される。

30

剛性の指示値Q1は、第4変換機10bに入力される。第4変換機10bは、回転角の指示値P1からワイヤ66bの張力が足首関節26の回りのモーメントを発生させる腕の長さを計算し、剛性の指示値Q1とモーメントの腕の長さから指示された剛性Q1に調整するのに必要なワイヤ張力Q2を計算する。ここでは図18に示したバネ特性が参照され、バネ定数とモーメントの腕の長さから、指示された剛性Q1に調整できるバネ特性を実現するワイヤ張力Q2に変換する。第5変換機12bは、張力Q2をモータトルクQ3に変換する。この変換には、図9のアクチュエータの特性式が利用される。モータのトルクの全部がワイヤ張力に反映されるわけでない。モータトルクの一部は、アクチュエータ等の摩擦や慣性に費やされる。第6変換機14bは、必要なワイヤ張力を発生するモータトルクQ3に摩擦や慣性に費やされる分を補償して実際に必要とされるモータトルクQ4を算出する。

40

50

摩擦や慣性に費やされる分を補償したモータトルク  $Q_4$  は、回転角のフィードバック制御によって算出されたモータトルクの増減値  $P_5$  に加算される。最終的には、加算されたモータトルク  $P_6$  が指令される。実際には、モータ 114b のトルクは通電電流に比例するので、モータ 114b に、加算されたトルク  $P_6$  に比例する電流を通電する。

#### 【0071】

コントローラ 200c についても、制御ブロックは同一であり、重複説明はしない。この場合、アクチュエータ 68b とアクチュエータ 68c は左右対称のために、 $P_2$  と  $Q_2$  と  $Q_3$  は、コントローラ 200b と 200c とで、異符号で同じ値を持つ。ただし、慣性項と摩擦項は左右対称にならないので、 $Q_4$  の値は等しくならない。

#### 【0072】

この制御ブロックによると、指示された剛性に調整するのに必要なモータトルク  $Q_4$  が加算される。このために、足首関節 26 の X 軸回りの剛性は、指示された剛性  $Q_1$  に制御される。指示された剛性  $Q_1$  に調整するためのモータトルク  $Q_3$  (ここではワイヤ張力となるモータトルク) は、アクチュエータ 68b とアクチュエータ 68c によるものがバランスし、足首関節 26 の X 軸回りの回転角に影響しない。足首関節 26 の X 軸回りの回転角は、剛性に調整するためのモータトルクと無関係に、指示された回転角  $P_1$  にフィードバック制御される。

図 22 の制御ブロックによると、回転角  $P_1$  と剛性  $Q_1$  が独立に指示されても、指示された回転角  $P_1$  と剛性  $Q_1$  に制御することができる。

上記した事象は、回転角と剛性の指示値  $P_1$ 、 $Q_1$  が時々刻々に変化する動作中常に得られ、経時的に変化する指示値  $P_1$ 、 $Q_1$  に常に追従させることができる。

剛性の指示値  $Q_1$  を歩行の状態に応じて経時的に変化させるには、歩行指令データの経時的变化に対応させてもよいし、ロボットの足の裏に接地されている力センサ 322 の出力に基づいて変化させてもよい。図 19 の場合、力センサ 322 が検知する力によって、モータドライバ 306、316 に指示する剛性の値を変化させる。

#### 【0073】

(第 2 の制御技術)

図 23 は、第 2 の制御技術に係わるコントローラ 200b とコントローラ 200c の制御ブロック図を示す。図 19 のドライバ 306 と 316 に対応する。この場合、逆キネマティクス演算回路 304 は、関節の回転角を調整するアクチュエータについては目標回転角を演算し、関節の回転角を調整するには冗長なアクチュエータについては目標剛性値を演算する。この場合、モータ 114b は関節の回転角を調整するアクチュエータであり、モータ 114c は関節の回転角を調整するには冗長なアクチュエータであり、剛性を調整する。

この場合、コントローラ 200b は、回転角の指示値  $P_1$  に基づいてモータ 114b の回転角をフィードバック制御し、コントローラ 200c は、剛性の指示値に基づいてモータ 114c のトルクをフィードバック制御する。モータ 114c の実際のトルク  $Q_6$  は、モータ 114c に通電する電流を測定する電流計 115c で測定される。モータは 114b、114c は、電流値とトルクが比例する特性をもっている。

モータ 114b の回転角のフィードバック制御のための制御ブロック図は、図 22 とほぼ同様であり、モータ 114c のトルクのフィードバック制御のための制御ブロック図も図 22 とほぼ同様であり、重複説明はしない。

この制御技術によると、指示された剛性  $Q_1$  に調整するために必要なトルクがモータ 114c から加えられる。このトルクが働いた状態で、モータ 114b は、指示された回転角  $P_1$  に調整するのに必要なだけ回転される。このとき、結果的には、モータ 114b のトルクも、指示された剛性  $Q_1$  に調整するのに必要なトルクに調整され、モータ 114c の回転角も、指示された回転角  $P_1$  に調整するのに必要な回転角に調整される。

図 23 の制御技術は、回転角という 1 の自由度に対して、2 個のモータを利用するという冗長性を利用して、回転角と剛性を独立に制御するものであり、ヒトに類似している。ヒトも、関節の自由度からみると冗長な数の筋肉を利用して関節の回りに回転させる。その

10

20

30

40

50

冗長性を利用して剛性を調整している。

図 23 の制御ブロックによると、回転角と剛性が独立に指示されたときに、指示された回転角と剛性に制御することができる。

【0074】

図 22, 23 の技術を用いると、歩行パターンに合わせて剛性を変化させることができ、姿勢を柔軟に変える必要があるときには柔軟にでき、姿勢を維持する必要があるときには剛性を上げて姿勢を維持することができる。本実施例では、図 21 で説明したように、接地した足の剛性を低くし、宙に浮いている足の剛性を高く調整しながら歩行する。

【0075】

本実施例では、歩行パターンにあわせて、ならい制御のためのゲイン  $k_3$  と、下肢の剛性を変化させる。ゲインの変化と剛性の変化のいずれか一方のみを用いても有用であるが、組合わせて用いることが有効であり、組合わせて用いると、ならい制御と剛性の変化の相乗作用によって、ロボットの挙動を柔軟で安定したものとする。

【0076】

図 5 に示した歩行指令データ作成装置 1 を用いて歩行指令データを作成する場合、通常は体幹姿勢については体幹姿勢ベクトル  $R$  のみを指定する。確かに、体幹姿勢ベクトル  $R$  を指定すれば、ロボットは円滑に歩行することができる。

ただしより高速で歩行する場合、体幹を振って歩行することが有利であり、体幹ベクトルの他に、体幹の振れに関する姿勢も入力するのが有利である。

【0077】

図 24 (A) は、従来のティーチング技術による場合の歩行姿勢を示し、体幹は前方に傾くことがあっても、振れることはない。そもそも体幹の振れを指定するベクトルが教示されていない。

図 24 (B) は、体幹の左右対称線の方角を示す体幹ベクトル  $R$  に加えて、体幹の左右を結ぶ線の方角を示す体幹振れベクトル  $Q$  を教示することによって得られる歩行姿勢を示している。足の動きに連動して体幹を振ると、体幹に対する足の動作速度が同じでも一步の歩幅を伸ばすことができ、ロボットは高速で歩行することが可能となる。

図 24 (C) は、体幹振れベクトル  $Q$  の教示例を示し、平面視している。左足先位置ベクトル  $C$  と、右足先位置ベクトル  $E$  を教示するために、左右の足の中心同士を結ぶ線が  $X$  軸となす角度がわかる。ここでは、体幹振れベクトル  $Q$  と  $X$  軸のなす角度が、左右の足の中心同士を結ぶ線が  $X$  軸となす角度の 50% となるような体幹振れベクトル  $Q$  をロボットにティーチングする。なお、前記の比率は 50% に限定されるものでなく、その前後の幅を有している。比率があまりに小さいと体幹を振る意味がなく、比率があまりに大きいと体幹に振るのに大きなエネルギーが費やされることになるので、30~60% くらいの範囲が好ましい。

足の動きに連動して振る体幹ベクトル  $Q$  を教示すると、同じ能力のロボットの歩幅を広げることができ、高速歩行させることができる。

体幹振れベクトルを指定する代わりに、左右の足の中心同士を結ぶ線が  $X$  軸となす角度から体幹振れベクトルを計算して求めるようにしてもよい。

【0078】

図 19 の制御装置では、体幹姿勢ベクトル  $R$  を入力し、逆キネマティクス演算し、入力された体幹姿勢ベクトル  $R$  に制御するために必要な関節角を演算し、そうして得られた関節角を目標関節角としてフィードバック制御するため、実際の体幹ベクトル  $R$  は、指示された体幹ベクトル  $R$ 、即ち、歩行指令データ作成装置 1 (図 5) で得られた体幹ベクトル  $R$  に一致するはずである。しかしながら、ロボットにジャイロを取付けて実際の体幹ベクトルを測定すると一致しないことが判明した。これは、関節のガタや部材のたわみ等に起因するものと推測される。

目標体幹姿勢ベクトルと実際の体幹姿勢ベクトルが一致しなければ、意図する体幹姿勢をロボットにとらせることができない。

本実施例では、図 5 の歩行指令データ作成装置 1 で作成された体幹姿勢ベクトル  $R$  (ここ

10

20

30

40

50

には、オペレータがロボットにとらせたい姿勢が記述されている)をそのままロボットに教示せず(そのまま教示すると、目標体幹姿勢ベクトルと実際体幹姿勢ベクトルが一致しないので、実際体幹姿勢ベクトルを意図したものに行うことができない)、目標体幹姿勢ベクトルと実際体幹姿勢ベクトルが一致しないことを見越し、目標体幹姿勢ベクトルを人為的に補正し、補正された目標体幹姿勢ベクトルと実際体幹姿勢ベクトルが一致しないために、結果として目標体幹姿勢ベクトルと実際体幹姿勢ベクトルを一致させる手法を採用している。

#### 【0079】

(1) 具体的は、最初に、歩行指令データ作成装置1で作成された体幹姿勢ベクトルRをロボットにティーチングする。ティーチングされたロボットを動作させて実際の体幹姿勢ベクトルRを検出する。

10

以下では、目標体幹姿勢ベクトルをR1とし、実際体幹姿勢ベクトルをR2とする。実際体幹姿勢ベクトルをR2はジャイロ328の出力を演算する装置330で演算される。

(2) 目標の体幹姿勢ベクトルR1と実際の体幹姿勢ベクトルR2のずれベクトル $\Delta R$ を計算する(図19の装置350)。ずれベクトル $\Delta R$ は、 $R1 \cdot R2^{-1}$ で計算できる。

(3) そこで、目標体幹姿勢ベクトルをR1の方を、ずれベクトル $\Delta R$ を見越して補正する。補正された目標体幹姿勢ベクトルをR1\*とすると、 $R1^* = R1 \cdot \Delta R$ で計算される。

(4) ロボットは、補正された目標体幹姿勢ベクトルR1\*を目標として動作する。ロボットによって実現される実際体幹姿勢ベクトルはR1\*とならない。それからはずれる。はずれた結果、目標体幹姿勢ベクトルR1に一致する。補正された目標体幹姿勢ベクトルR1\*は、オペレータと意図する体幹姿勢ベクトルR1にずれベクトル $\Delta R$ を見越して補正されているからである。

20

(5) 補正された目標体幹姿勢ベクトルをR1\*を計算する際に、まず、 $Y = \alpha \cdot \Delta R + (1 - \alpha) \cdot I$ を計算し、ついで、 $R1^* = R1 \cdot Y$ で計算してもよい。図19の補正装置352は、この処理を実行する。ここで、 $\alpha$ は1以下の正の値であり、Iは単位ベクトルである。

この場合、ずれベクトル $\Delta R$ の $\alpha\%$ だけを見越して目標体幹姿勢ベクトルR1を補正することに相当する。

30

目標体幹姿勢ベクトルの補正処理は、種々の段階で実施できる。ずれベクトル $\Delta R$ が判明した段階で、歩行指令データ作成装置1で作成された体幹姿勢ベクトルRを補正し、補正された目標体幹姿勢ベクトルをロボットに教示してもよい。この場合、ロボットの制御装置には、目標体幹姿勢ベクトルを補正するための装置350、352は要らない。それに代わって、ずれベクトル $\Delta R$ で補正する前の目標体幹姿勢ベクトルをロボットに教示し、ロボットの動作中に次々とずれベクトル $\Delta R$ を算出し、ずれベクトル $\Delta R$ が算出されとき以降の目標体幹姿勢ベクトルをずれベクトル $\Delta R$ で補正するようにしてもよい。

#### 【0080】

以上、本発明の具体例を詳細に説明したが、これらは例示にすぎず、特許請求の範囲を限定するものではない。特許請求の範囲に記載の技術には、以上に例示した具体例を様々な変形、変更したものが含まれる。

40

例えば本実施例では、力センサ322の信号を演算する装置324によって、ロボットが静止しているか歩行しているかを判別し、その判別結果によってゲインk1、k2を切替えるが、歩行指令データの時系列変化に対応してゲインk1、k2を変化させてもよい。また、ゲインk1、k2は、大小の間で不連続的に切替えてもよいし、連続的に変化させてもよい。

また本実施例では、体幹位置ベクトルPが指すポイントと目標ZMPを結ぶ傾斜線と、目標ZMPを通る垂線がなす角度 $\phi$ によって、目標ZMPの修正量を計算するが、ロボットの実際の体幹位置の高さが実質上変わらなければ、角度 $\phi$ に代えて、ロボットの実際の体幹位置と目標ZMPの水平方向の偏差を用いてもよい。

50

また、本実施例では、角度 $\phi$ （または水平偏差）に比例微分処理を施して目標ZMPの修正量を計算するが、単純に比例させるだけでもよいし、比例微分積分処理してもよい。本明細書または図面に説明した技術要素は、単独であるいは各種の組み合わせによって技術的有用性を発揮するものであり、出願時請求項記載の組み合わせに限定されるものではない。また、本明細書または図面に例示した技術は複数目的を同時に達成するものであり、そのうちの一つの目的を達成すること自体で技術的有用性を持つものである。

#### 【0081】

【発明の効果】本発明によると、ロボットの歩行中は「倒立振子制御」が適度に効くために転倒しないで歩行することができ、静止中は「倒立振子制御」の効きが抑制されるために「自励振動」を起こさない。ロボットが自励振動のために動力を無駄に消費することが防止される。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】目標ZMPが移動する様子を説明する図。

【図2】シャープに変化する目標ZMPをスムーズにした各種のカーブを例示する図。

【図3】目標ZMPが移動する他の例を説明する図。

【図4】目標ZMPのデータを出力する速度が可変であることを説明する図。

【図5】歩行指令データ作成装置の構成を示す図。

【図6】本実施例のロボットの両下肢の正面図。

【図7】同ロボットの左下肢の側面図。

【図8】同ロボットの足首関節の構造を説明するための図。

【図9】同ロボットのアクチュエータの詳細を説明する図。

【図10】同ロボットの足部の動きを説明する図。

【図11】同ロボットの足部の動きを説明する図。

【図12】同ロボットの足部の動きを説明する図。

【図13】同ロボットの足部の動きを説明する図。

【図14】ワイヤの組込まれている非線形バネの正面図。

【図15】ワイヤの組込まれている非線形バネの側面図。

【図16】ワイヤテンションによって非線形バネが変形する様子を示す図。

【図17】同ロボットの関節回りの剛性を説明する図。

【図18】非線形ばね特性と関節回りの剛性を説明するグラフ。

【図19】制御装置の構成を示す制御ブロック図。

【図20】歩行パターンに追従してならない制御のためのゲインを増減するパターンを示す図。

【図21】歩行パターンに追従して下肢の剛性を増減するパターンを示す図。

【図22】関節回転角と剛性を独立に制御する第1の制御ブロック図。

【図23】関節回転角と剛性を独立に制御する第2の制御ブロック図。

【図24】体幹振じれベクトルの教示方法と教示結果を模式的に示す図。

#### 【符号の説明】

1：歩行指令データ作成装置

2：ZMP演算部

3：比較部

4：体幹位置ベクトル修正部

5：完成した歩行指令データ

10：ロボット

12：下肢部

14：大腿部

16：下腿部

18：足部

20：胴体部

22：股関節

10

20

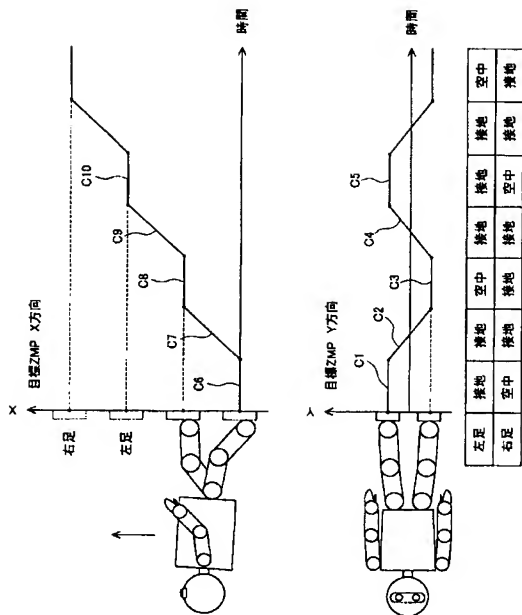
30

40

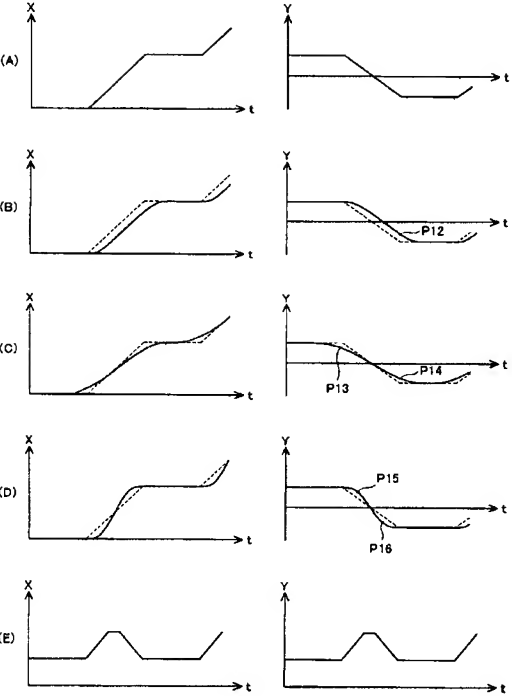
50

24	： 膝関節	
26	： 足首関節	
28	： 骨盤部	
30	： シャフト	
32	： ユニバーサルジョイント	
34	： ベアリング	
36	： 円板	
38	： モータ	
40	： フランジ	
42	： シャフト	10
44	： フランジ	
46	： 軸	
48a, 48b, 48c	： ワイヤ終端ガイド	
49a, 49b, 49c	： ワイヤ接続点	
50a, 50b, 50c	： ワイヤ	
52a, 52b, 52c	： アクチュエータ	
54	： プーリ	
56	： アクチュエータ	
58	： フランジ	
60	： フランジ	20
62	： 十字型自在継手	
64a, 64b, 64c, 64d	： プーリ	
66a, 66b, 66c, 66d	： ワイヤ	
68a, 68b, 68c, 68d	： アクチュエータ（ボールネジ）	
102	： フランジ	
104	： 可動プレート	
106	： フランジ	
108	： 案内ロッド	
110	： 案内ロッド	
112	： 案内ロッド	30
114	： モータ	
116	： ギヤ	
118	： ギヤ	
120	： 送りネジ	
122	： 平板部	
124	： 峰部	
126	： フランジ	
128	： シャフト	
130	： フランジ	
132	： シャフト	40
304	： 逆キネマティクス計算部	
334	： 倒立振子モデル	
k1, k2, k3	： ゲイン	
322	： カセンサ	
328	： ジャイロ	
350	： ずれベクトル演算部	
352	： 目標体幹姿勢ベクトル補正ベクトル演算装置	

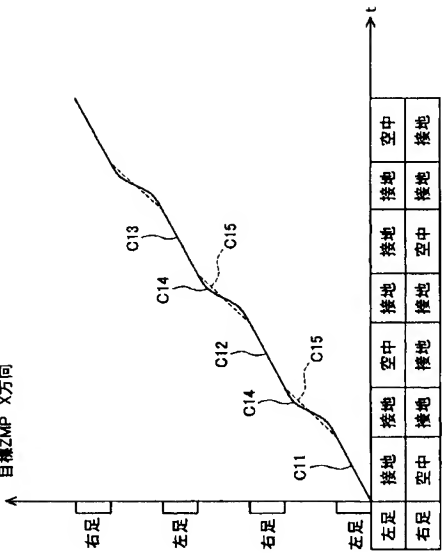
【図 1】



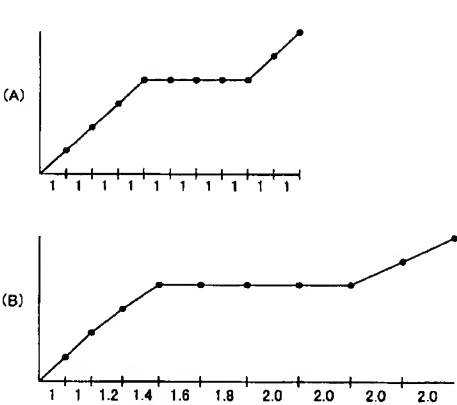
【図 2】



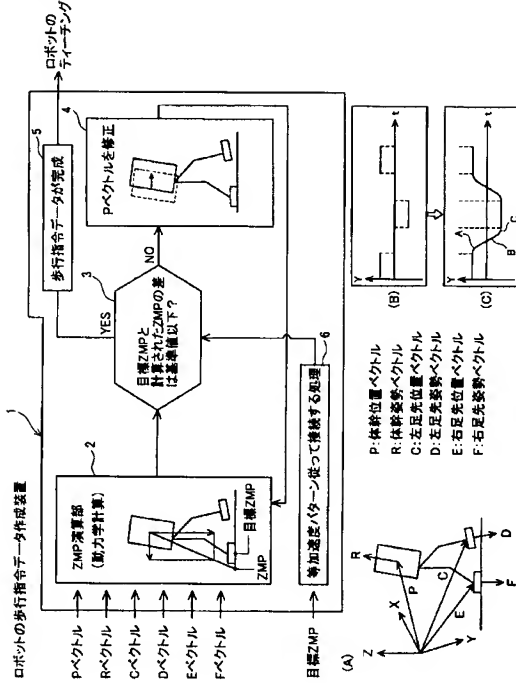
【図 3】



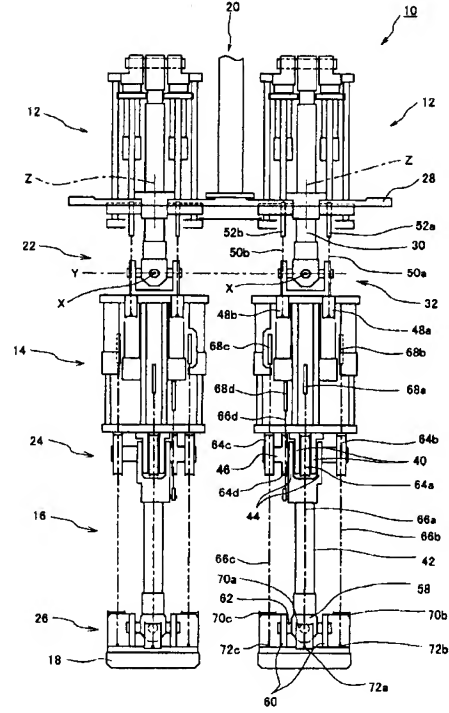
【図 4】



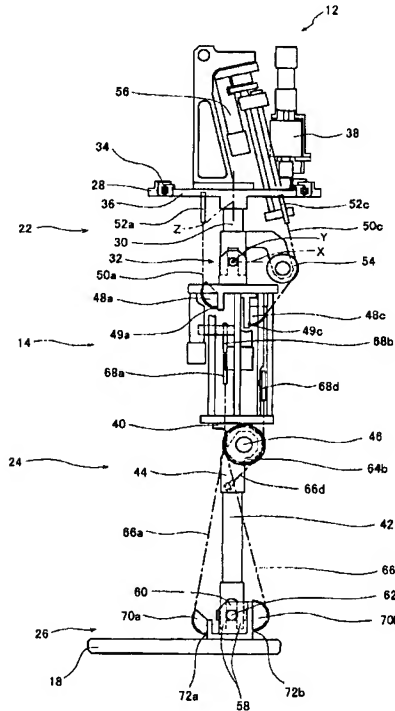
【図 5】



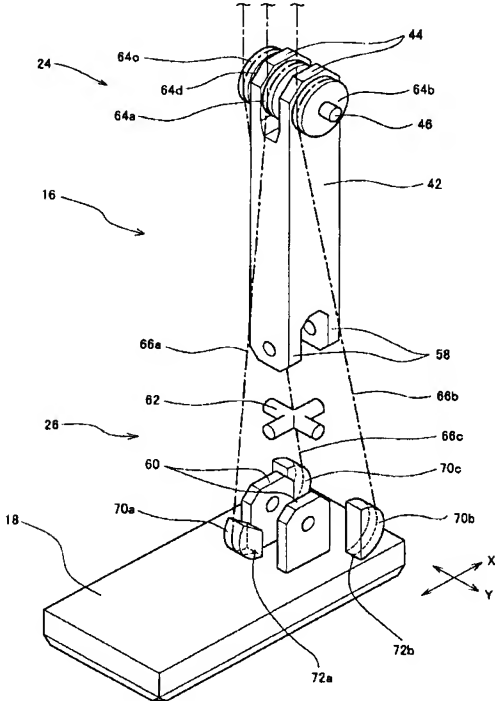
【図 6】



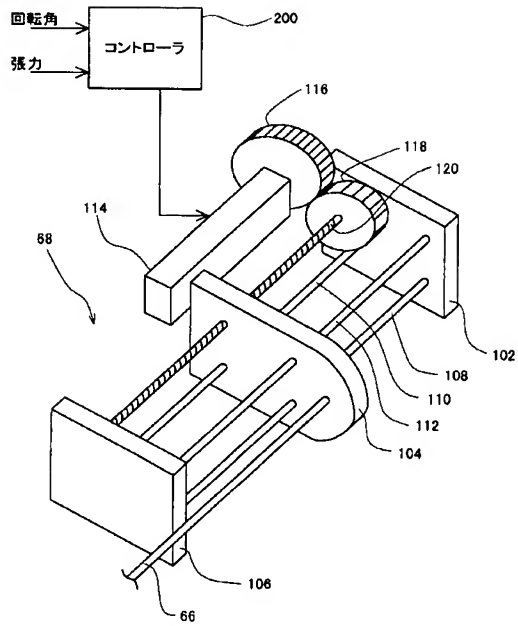
【図 7】



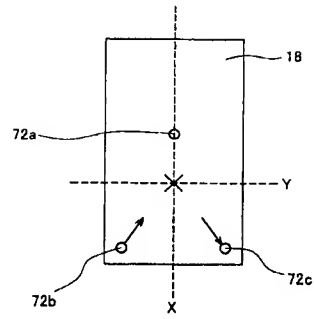
【図 8】



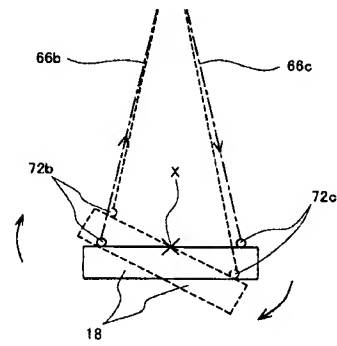
【図 9】



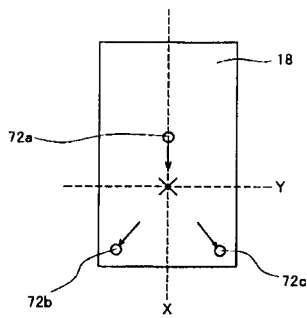
【図 10】



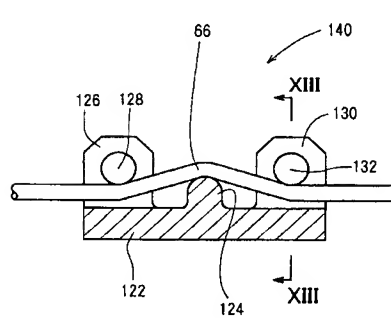
【図 11】



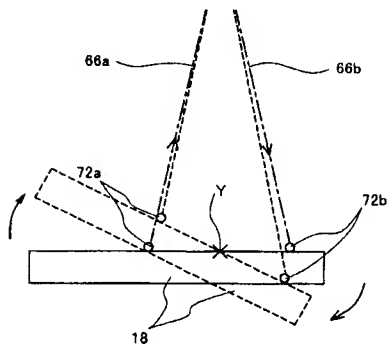
【図 12】



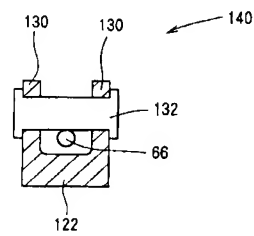
【図 14】



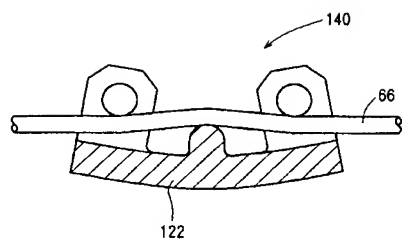
【図 13】



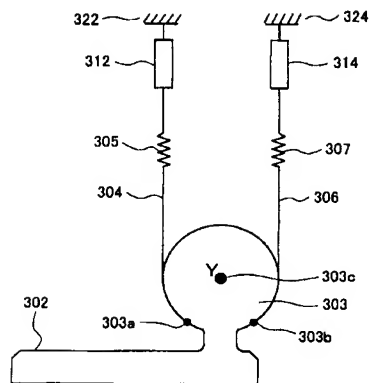
【図 15】



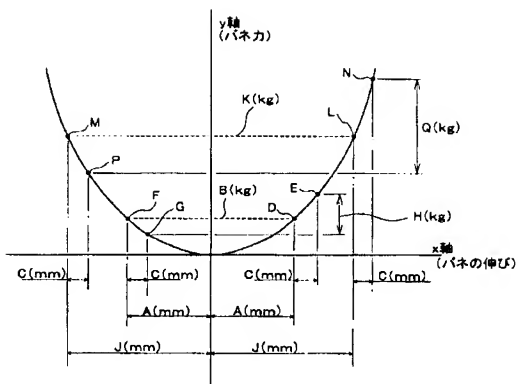
【 例 1 6 】



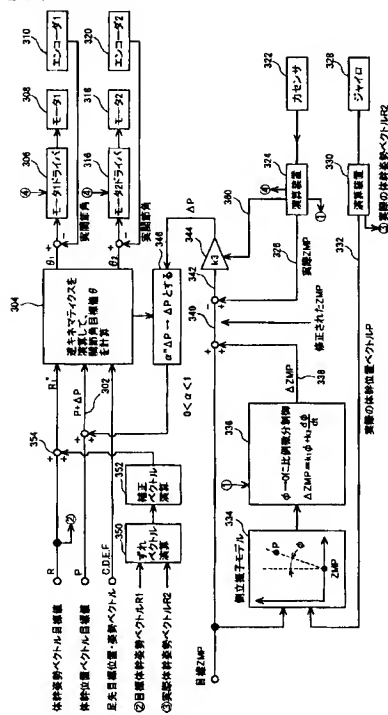
【 図 1 7 】



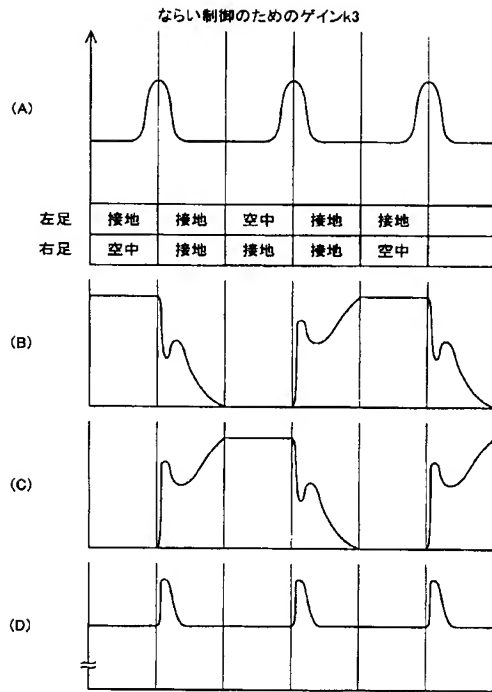
【图 18】



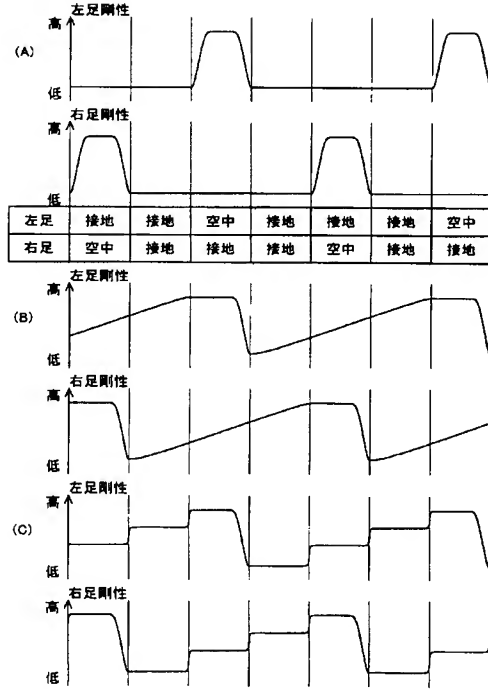
【 図 1 9 】



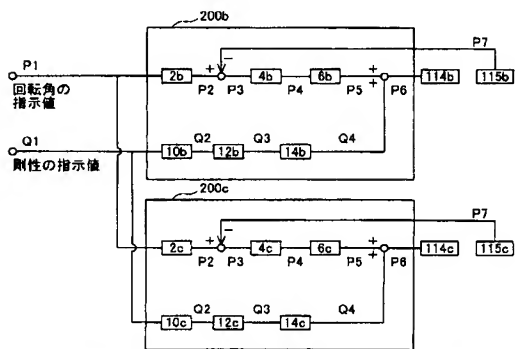
【図 2 0】



【図 2 1】



【図 2 2】



P2: はねの伸びがゼロとしたときに、指示値を実現するモータ回転角

P3: 指示回転角と実際回転角の偏差

P4: モータ回転速度

P5: モータトルク

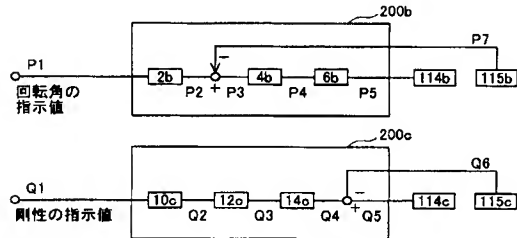
P6: トルク指令値

P7: 実際回転角

Q2: 張力

Q3: モータトルク

【図 2 3】



【図 24】

